مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية

المنظمة العربية للترجمة

إدوارد س. كاسيدي بيتر ز. غروسمان

مدخل إلى الطاقة

المصادر والتكنولوجيا والمجتمع

ترجمة

صباح صدّيق الدملوجي



سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدّمة

المنظمة العربية للترجمة

إدوارد س. كاسيدي

بيتر ز. غروسمان

مدخل إلى الطاقة
المصادر والتكنولوجيا والمجتمع

ترجمة

صباح صدّيق الدملوجي

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية

المنظمة العربية للترجمة

إدوارد س. كاسيدي

بيتر ز. غروسمان

مدخل إلى الطاقة
المصادر والتكنولوجيا والمجتمع

ترجمة

صباح صدّيق الدملوجي

مراجعة

د. محمد الشيخلي

ص. 4

(تُحسم مع د. بسام ضو وفاتن رسلان)

المحتويات

تقديم

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية
مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي

يطيب لي أن أقدم لهذه السلسلة التي جرى انتقاؤها في مجالات تقنية ذات أولوية للقارئ العربي في عصر أصبحت فيه المعرفة محركاً أساسياً للنمو الاقتصادي والتقني، ويأتي نشر هذه السلسلة بالتعاون بين مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية والمنظمة العربية للترجمة، ويقع في إطار تلبية عدد من السياسات والتوصيات التي تعنى باللغة العربية والعلوم ومنها:

أولاً : البيان الختامي لمؤتمر القمة العربي المنعقد في الرياض 1428هـ - 2007م الذي يؤكد ضرورة الاهتمام باللغة العربية، وأن تكون هي لغة البحث العلمي والمعاملات حيث نص على ما يلي: (وجوب حضور اللغة العربية في جميع الميادين بما في ذلك وسائل الاتصال، والإعلام، والإنترنت وغيرها).

ثانياً : «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية» في المملكة العربية السعودية التي انبثق عنها اعتماد إحدى عشرة تقنية إستراتيجية هي: المياه، والبترول والغاز، والبتروكيميائيات، والتقنيات المتناهية الصغر (النانو)، والتقنية الحيوية، وتقنية المعلومات، والإلكترونيات والاتصالات والضوئيات، والفضاء والطيران، والطاقة، والمواد المتقدمة، والبيئة.

ثالثاً :مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي التي تفعّل أيضاً ما جاء في البند أولاً عن حضور اللغة العربية في الإنترنت، حيث تهدف إلى إثراء المحتوى العربي عبر عدد من المشاريع التي تنفذها مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية بالتعاون مع جهات مختلفة داخل المملكة وخارجها. ومن هذه المشاريع ما يتعلق برقمنة المحتوى العربي القائم على شكل ورقي وإتاحته على شبكة الإنترنت، ومنها ما يتعلق بترجمة

الكتب الهامة، وبخاصة العلمية، مما يساعد على إثراء المحتوى العلمي بالترجمة من اللغات الأخرى إلى اللغة العربية بهدف تزويد القارئ العربي بعلم نافع مفيد.

تشتمل السلسلة على ثلاثة كتب في كلٍّ من التقنيات التي حددتها «السياسة الوطنية للعلوم والتقنية». واختيرت الكتب بحيث يكون الأول مرجعاً عالمياً معروفاً في تلك التقنية، ويكون الثاني كتاباً جامعياً، والثالث كتاباً عاماً موجهاً إلى عامّة المهتمين، وقد يغطي ذلك كتاب واحد أو أكثر. وعليه، تشتمل سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة على ما مجموعه ثلاثة وثلاثون كتاباً مترجماً، كما خصص كتاب إضافي منفرد للمصطلحات العلمية والتقنية المعتمدة في هذه السلسلة كمعجم للمصطلح.

ولقد جرى انتقاء الكتب وفق معايير، منها، أن يكون الكتاب من أمهات الكتب في تلك التقنية، ولمؤلفين يشهد لهم عالمياً، وأنه قد صدر بعد عام 2000، وأن لا يكون ضيِّق الاختصاص بحيث يخاطب فئة محدودة، وأن تكون النسخة التي يترجم عنها مكتوبة باللغة التي ألّف بها الكتاب وليست مترجمة عن لغة أخرى، وأخيراً أن يكون موضوع الكتاب ونهجه عملياً تطبيقياً يصبّ في جهود نقل التقنية والابتكار، ويساهم في عملية التنمية الاقتصادية من خلال زيادة المحتوى المعرفي العربي.

إن مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية سعيدة بصدور هذه المجموعة من الكتب، وأود أن أشكر المنظمة العربية للترجمة على الجهود التي بذلتها لتحقيق الجودة العالية في الترجمة والمراجعة والتحرير والإخراج، وعلى حسن انتقائها للمترجمين المتخصصين، وعلى سرعة الإنجاز، كما أشكر اللجنة العلمية للمجموعة التي أنيط بها الإشراف على إنجازها في المنظمة وكذلك زملائي في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية الذين يتابعون تنفيذ مبادرة الملك عبد الله للمحتوى العربي.

الرياض 1431/3/20 هـ

رئيس مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية

د. محمد بن إبراهيم السويل

تتطلب قضايا الطاقة والتلوث واستنزاف المصادر والاحتباس الحراري والنفايات النووية حلولاً مناسبة. ويوفر هذا الكتاب بحثاً ناقداً في المصادر وقوى السوق والآثار المترتبة على الإنتاج الحديث للطاقة.

ويتحرى **مدخل إلى الطاقة: المصادر والتكنولوجيا والمجتمع** منافع الطاقة ومشاكلها. ويكتب المؤلفان من منظور التقييم النقدي للتأثيرات الفلسفية والاجتماعية لقضايا التكنولوجيا وليس من منظور التأييد. ويتناول الكتاب المآزق التي نشأت بسبب الاعتماد الكبير على الطاقة وخصوصاً على المصادر الأحفورية، كما ويتحرى تكنولوجيات إنتاج الطاقة من المصادر البديلة المتوفرة. كذلك يقدم تقييماً واقعياً للطاقة النووية والتكنولوجيات المتجددة أكانت شمسية أو من الريح أو الكتلة الحيوية قدر ما يتعلق الأمر بإمكاناتها في التعويض عن المصادر التقليدية. وتتبع الطبعة الثانية هذا الأسلوب الأساسي الشامل لتناول الموضوع كما في الطبعة الأولى، غير أن هناك توكيداً أكبر على القضايا التي تتصدر النقاش الحالي عن الطاقة: ومنها مثلاً، مفهوم استدامة الطاقة وآثار انبعاثات غازات الدفيئة على التغير المناخي العالمي، وكذلك إعادة هيكلة صناعة الطاقة بصورة جذرية بسبب إزالة القيود في العديد من الأقطار حول العالم.

وهذا الكتاب موجّه إلى قاعدة من القرّاء عريضة ولا يفترض أي خبرة تقنية سابقة، كما يتجنب المعادلات الرياضية المعقدة لكي يشجع على التعرف الوثيق على القضايا

التكنولوجية المثيرة للجدل وعلى الإجراءات الكمية بطريقة يمكن فهمها من قبل القراء. وستتبع الطبعة الأولى الطبعة الثانية في توفير كتاب مرجعي لبرامج طلبة مرحلة البكالوريس في العلوم والتكنولوجيا والمجتمع. وقد برهن الكتاب أيضاً على فائدته كمرجع مكمل في عدد من البرامج التقنية وبرامج السياسة العامة بما في ذلك السياسات البيئية والتكنولوجية والقانون البيئي وقانون المعادن وقانون الأعمال وكذلك اقتصاديات الطاقة والموارد.

إدوارد س. كاسيدي: أستاذ شرف في قسم الهندسة الكهربائية جامعة البولي تيكنيك، بروكلين، نيويورك.

بيتر ز. غروسمان: يشغل كرسي إيفرويمسون وهو أستاذ مشارك في الاقتصاد في كلية إدارة الأعمال، جامعة بتلر في ولاية إنديانا.

مقدمة المترجم

الطاقة ثم الطاقة ثم الطاقة، كانت هم الإنسان الأول منذ ارتقى عن المرتبة الحيوانية وبدأ يدرك الأشياء، وربما كان يبحث عن الطاقة قبل أن يعرف كُنْهها. فالطاقة من مصادرها الطبيعية تقوم مقامه في أداء الأعمال، لا بل تقوم بأشياء يستحيل عليه أداؤها هو أو العبيد الذين يملكهم من بني جنسه أو الحيوانات التي كان يعتمد على طاقتها.

ربما عرفها صدفة في طاقة النار التي وفرتها له الطبيعة من آثار البرق أو من حمم البراكين، فدجّنها وابتكر الطرق لإيقادها واستغلها لأداء ما يستحيل عليه أداؤه من طبخ لحوم الحيوانات التي يصطادها إلى تدفئة مأواه كذلك، وطورها مستغلاً قابلية احتراق الخشب المتوفر لديه لتركيزها واستخدمها في صهر المعادن. وعرفها أيضاً في طاقة الريح والماء، وكلها وفرت له جهداً وأتاحت له حياة أسهل وأغنى، واستمر الجنس البشري يستغل هذه المصادر، وكذلك طاقة الحيوانات التي دجنها لأداء الأعمال أو للتنقل ردحاً طويلاً جداً منذ عصور ما قبل التاريخ السحيقة حتى عهد قريب. ورغم محدودية هذه الأنواع من الطاقة إلا أن افتقاره إلى طاقة مركزة كتلك التي يوفرها الفحم أو النفط ناهيك بالطاقة النووية لم يمنعه من ارتياد البحار للتجارة أو للهجرة أو الغزو، ولم يحل دون بناء الدول والإمبراطوريات وتطوير حياته ورخائه إلى مستويات ليست بالقليلة، فبنى صروحاً هائلة من أهرامات الجيزة إلى كوليسيوم روما، ومن قنوات الري في أرض الرافدين والصين والهند وصولاً إلى كاتدرائيات أوروبا العظيمة وسور الصين الجبار وغيرها من دون طاقة نفط أو غاز طبيعي ومن دون مجارف آلية أو رافعات كهربائية جوّالة اعتمدها في تلك الأعمال.

ورغم معرفته بالفحم الحجري واستخدامه لبضع مئات من السنين إلا أن طاقة هذا

الفحم لم تستغل لتوليد البخار إلا قبل قرنين أو ثلاثة، وهو ما فتح باب الثورة الصناعية على مصراعيه ونقل الإنسان إلى عالم جديد لم يكن يحلم به، فالطاقة المركزة في البخار كانت فتحاً جديداً سيّر القطارات وعوّض عن الريح كطاقة لإدارة السفن وكل ذلك زاد من سرعة الإنسان ووسع مداه كفرد، ووسع سطوة مؤسساته كدول.

واكتشف الإنسان أنواعاً غريبة من الطاقة، إضافة إلى الطاقة التي فكر بها كقوة بهيمة (أي القوة الميكانيكية) فعرف الكهرباء وإمكاناتها المختلفة، ثم اكتشف كيف يحول الطاقة البهيمة التي يوفرها الفحم والبخار إلى نوع آخر وكان ذلك فتحاً جديداً سار به خطوة كبيرة أخرى.

وجاءت ماكنة الاحتراق الداخلي لتستخدم تلك المادة القديمة الغريبة النفط أو – سائل النار – كما كانت تعرفه بعض الأقوام القديمة، لتوليد الطاقة الآن داخل الآلة ذاتها فامتلكنا السيارة ومن ثم الطائرة.

وإذا ما كان الاحتراق بمختلف أنواعه من احتراق خشب أو فحم أو نفط أو غاز أو من انفجار البارود والديناميت ليس إلا استغلالاً لاختلاف مستوى الطاقة المتوفرة في الأواصر الكيميائية بين الذرات، وكان الإنسان يستخدمها منذ عصور ما قبل التاريخ من دون أن يعرف طبيعتها طبعاً، إلا أن عِلمه في القرن العشرين فتح له معرفة بالطاقة الهائلة التي تربط الجسيمات داخل نواة الذرة والتي تفوق قوى الأواصر بين الذرات بما قد يصل إلى ملايين المرات كما اكتشف طرق استغلالها، وذلك ما أتاح له مورداً لنوع جديد من الطاقة لم يكن يحلم به قبل عقود قليلة وحسب من أول تفجير نووي عام 1945. وهذه الطاقة بمآسيها ومنافعها ربما لن تكون آخر صنف يتوفر للبشر، فالإنسان كائن غريب يختلف عن كل خلق الله بعدم قناعته بما هو متوفر له، وبالعبقرية التي حباه الله بها، وربما يكتشف مصادر جديدة غير مرئية لدى جيلنا هذا. ومع هذا التطور والتوسع في استخدام أصناف الطاقة وبخاصة طاقة المصادر الأحفورية – النفط والغاز الطبيعي والفحم – والذي وصل بالإنسان إلى هذا المستوى الرفيع من العيش والراحة والتمكن، ما زالت هناك مشاكل قدر تعلق الأمر بالطاقة.

أولها عدم كفايتها وسعي الإنسان إلى الحصول على المزيد منها، فهناك مليارات من البشر يصبون إلى الوصول إلى مستوى حياة الأوروبيين وساكني أميركا الشمالية،

وهم في حاجة إلى كم كبير من الطاقة ليبلغوا ذلك المستوى. وهذا يولد النزاعات للسيطرة على الكم المحدود من أنواع الطاقة المعروفة.

والأمر **الثاني** هو سوء استخدام هذه الموارد من الطاقة، أو بالأحرى الاستخدام المتزايد وحسب. فكوكب الأرض بيئة شبه محددة، تتلقّى طاقة حرارية من الشمس وكانت في العصور الجيولوجية المتأخرة على الأقل في حالة توازن مثل التي نعيشها الآن، أو باختلاف بسيط عنها في ما يخص درجات الحرارة. وهذا التوازن هو الذي يشكل ما يعرف بالبايوسفير أو المحيط الحيوي الذي كان ملائماً للحياة، لا بل ربما كان السبب في نشوء الحياة بمختلف أنواعها من أحاديات الخلية صعوداً في التعقيد إلى مستوى الإنسان. وهذا المحيط الحيوي أو ما ندعوه اختصاراً بالبيئة حالة دقيقة تعتمد على عشرات العوامل. ومدى التباين في هذه العوامل ضمن النظام البيئي محدود، ولإخرج النظام عن التوازن. ويبدو أن الاستهلاك المفرط لبعض أنواع الطاقة من قبل الإنسان خلال العقود الأخيرة ربما دفع ببعض هذه العوامل خارج نطاق السيطرة الطبيعية، مما يهدد بتغير النظام إلى حالة منفلتة أو على الأقل إلى مستوى غير معهود يحدث فيه توازن غير ملائم لعيش الإنسان والعديد من الأجناس النباتية والحيوانية الأخرى. وهذا معناه إما انقراض الجنس البشري فنكون كمن حفرت حتفها بظلفها، أو ربما يتيح التوازن الجديد وجود الإنسان في ظروف مختلفة أقل ما يتوقع فيها أنها ستكون أقسى جداً من الظروف التي عرفها منذ فجر التاريخ أو حتى قبل ذلك.

من هنا نشأ المأزق الذي تواجهه البشرية اليوم: الحاجة إلى كم أكبر من الطاقة، وصعوبة استيعاب المحيط الحيوي في كوكب الأرض لهذا الاستخدام الهائل للطاقة من المصادر التي نعتمدها اليوم. إن نجاح الإنسان أو فشله في إيجاد حل لهذا المأزق سيقرر مستقبل الإنسانية.

عرض المؤلفان في مقدمتهما مواضيع الكتاب ونهجه والفئة المقصودة فيه. والكتاب مرجع ممتاز أكان ذلك لطلاب الهندسة والعلوم في مرحلة أولية، أو كمرجع للثقافة العلمية حول الطاقة لدارسي الإنسانيات. غير أن الأحداث المتسارعة في ميدان الطاقة تحتاج إلى تحديث معلومات الكتاب وإضافة ما استجد عليها، أكان

ذلك في ما يتعلق بالحقائق حول مصادر الطاقة، أو في ما يتعلق بتطور المنظور إلى طرق استهلاك الطاقة، وإلى التأثيرات البيئية والاجتماعية لها، وأخيراً حول ما نفعله لأجل أجيالنا المستقبلية قدر تعلق الأمر بتوفير الطاقة.

هناك كما أسلفنا مشكلتان رئيسيتان: ازدياد الطلب على الطاقة وقلة مصادرها أولاً، ونتائج الاستهلاك المفرط للطاقة.

والطلب المتزايد على الطاقة ناجم بالدرجة الأولى عن زيادة التصنيع وما يتبعه من ارتفاع مستوى المعيشة في كثير من أقطار خارج أوروبا وأميركا، فالصين والبرازيل والهند ومعظم دول جنوب وشرق آسيا تشهد توسعاً صناعياً كبيراً وزيادة في الدخل وطلباً أكبر على الطاقة.

ومعظم الطلب الجديد ينصب على النفط ومنتجاته وعلى الغاز الطبيعي، لذا أصبح الهم الأول للعديد من رجال الاقتصاد والسياسة تأمين مصادر جديدة لهذين النوعين من مصادر الطاقة. وأصبحت فكرة وصول إنتاج النفط إلى ذروته أمراً يؤرق الجميع وبخاصة أن مثل هذا حَدَثَ في الولايات المتحدة في أوائل سبعينيات القرن العشرين ولا مناص من حصوله على مستوى العالم. وقد تنبأ البعض أنه حصل أو سيحصل عن قريب جداً. وإذا كان الوصول إلى ذروة الإنتاج أمراً لا مناص منه، إلا أن عدداً من الاكتشافات الجديدة لحقول هائلة لا يزال يدفع بذلك التاريخ سنين إلى الأمام. ففي أميركا ذاتها (في ولايتي داكوتا وولاية مونتانا)، وفي المحيط الأطلسي أمام البرازيل اكتشفت خلال السنتين الماضيتين حقولٌ عملاقة، كما اكتشفت عشرات الحقول في الدول الأفريقية، ولا يزال العراق رغم احتياطه المثبت الهائل شبه بكر يحتاج إلى استكشاف كبير ربما يضاعف من هذا الاحتياطي.

وإذا ما استُنفد النفط أو شح فلدى العالم الغاز الطبيعي. وقبل أن أتكلم عن مصادر الغاز الطبيعي أود القول إن تحويل الغاز إلى منتجات هيدروكاربونية سائلة انتقل من الإنتاج الريادي إلى الإنتاج التجاري، وهناك في دولة قطر وحدها اليوم ثمانية مشاريع من هذا النوع. وهناك أيضاً تسارع في كافة الدول التي تمتلك مصادر غاز طبيعي نائية يصعب تسويقها، أو في تلك التي لديها غاز طبيعي وافر من النوع الذي يصاحب إنتاج النفط إلى بناء مشاريع من هذا النوع لتحويل الغاز كيميائياً ـ بخلاف تسييله بالتثليج ـ إلى منتجات سائلة. وهناك تسارع أيضاً في تذليل طرق كيميائية مستحدثة لتحويل

الغاز أبسط في طبيعتها وفي تشغيلها من الطريقة الحالية المعقدة. وإذا ما وصلت هذه الطرق إلى السوق التجارية فستوفر كميات أكبر من هذه المنتجات التي تتصف بخواص ممتازة تتفوق على نواتج تكرير النفط الخام.

غير أن قائلاً سيقول إن مصادر الغاز الطبيعي محدودة أيضاً، وسنصل إلى ذورة الإنتاج بعد عقد أو عقدين من وصول النفط إلى ذروته الإنتاجيه. ذلك كان صحيحاً حسب المعلومات التي كانت متوفرة قبل عشر سنوات. أما الآن فقد برزت حقيقتان جديدتان. **أولاهما** أن الغاز الطبيعي المدعو (Shale Gas) أو غاز الطَفَل وهو موجود بوفرة إنما في نوع من الصخور الصلصالية ذات النفاذية الصعبة، أصبح استخراجه اليوم بتقنيات الحفر الأفقي وتقنيات التفتيت الهيدروليكي الحديثة مجدياً اقتصادياً. وهذا ما أضاف نحو 50 في المئة إلى احتياطيات الغاز المتوفرة حسب تقديرات أولية، وسبّب انخفاضاً في أسعار الغاز، ما دفع المنتجين الكبار كي يجتمعوا مؤخراً (في الدوحة بدولة قطر) ليؤسسوا تجمعاً شبيهاً بالأوبك مهمته الأولى الحفاظ على الأسعار.

الشيء **الثاني** هو هيدرات الغاز (Gas Hydrates) أو بلورات الغاز المائية وهي بلورات مائية محتبس فيها غاز الميثان. وتوجد هذه البلورات بكميات هائلة في مناطق عديدة في قاع البحار والمحيطات وحتى في قاع البحيرات العميقة في المناطق الباردة. وكميات هذه البلورات غير مقدرة بدقة، إلا أنها بأي مقياس كافية لسد احتياجات البشر للوقود الهيدروكاربوني لآلاف السنين. ورغم بحوث شركات النفط والغاز حول طريقة لاستغلال هذه البلورات إلا أنهم لم يتوصلوا إلى طريقة ذات جدوى تقنية واقتصادية لاستغلالها. غير أنني متأكد من أن عبقرية الإنسان ليست قاصرة عن تذليل هذه القضية حين تدعو الحاجة إلى مصدر جديد للغاز.

إذاً، مع هذا المصدر الهائل للغاز ومع طريقة تحويل الغاز إلى السوائل المدعوة تكنولوجيا الغاز ـ إلى ـ سوائل (Gas – to – Liquids) أو (GTL اختصاراً) نستطيع أن نضمن توفر وقود لأجيال عديدة قادمة ولا حاجة إلى القلق على احتياجات أحفادنا.

وإذا ما وفرنا الحل لنقص موارد الطاقة وضمنا ذلك بسعر معقول، وإذا ما اقترن ذلك بزيادة التصنيع عالمياً وارتفاع مستوى المعيشة فسيزداد استهلاك الطاقة وبخاصة من المصادر الأحفورية (الهيدروكاربونية)، وهذا سيؤدي بنا إلى المشكلة

الثانية وهي النتائج المتوقعة من الاستهلاك المفرط لهذه الأنواع من الطاقة. والمترتبات غير الحميدة لهذا الاستهلاك تقع ضمن محورين أساسيين: تلوث يمكن التخلص منه عند المصدر ولو أن ذلك مكلف، وتلوث آخر لا يمكن التخلص منه عند المصدر بل يتطلب التخلص منه معالجات مختلفة.

يقع ضمن النوع **الأول** التلوث بأكاسيد الكبريت الذي يوجد وبنسب مختلفة في كافة أنواع النفط وفي بعض أنواع الغاز، وقد سعى العالم إلى التخلص من أكبر كم منه عند المصدر في وحدات خاصة تعالج النفط الخام قبل تكريره في المصافي. وما زالت المواصفات الدولية تضيّق مجال السماح حول وجود الكبريت في المنتوج المعد للتسويق. وقد نتج من هذا التضييق على كميات الكبريت إنتاج وقود ديزل شبه خالٍ من الملوثات الكبريتية وهو ما سمح باستخدامه في السيارات الشخصية، ووصلت نسبة مبيعاتها من هذا النوع في بعض الدول الأوروبية إلى نحو ثلثي السيارات التي تباع حديثاً، وهي تستخدم ما ذكرناه ويعرف بوقود الديزل النظيف. وفي هذا توفير للمستهلك وللبلد لأن الوقود الذي يستهلكه محرك الديزل يقل بنحو 30 في المئة عن المحرك العامل بالبنزين.

النوع **الثاني** من التلوث ناجم عن ثاني أكسيد الكربون، وهو النتيجة الطبيعية لاحتراق الكربون في الوقود الهيدروكربوني أكان نفطاً خاماً أم بنزيناً أم وقود ديزل، وأيضاً أكاسيد النيتروجين وهي ناتج عرضي لعملية الاحتراق تتولد من الحرارة العالية لهذه العملية ومن تأكسد النيتروجين في الهواء. وأكاسيد النيتروجين عوامل غير صحية، كما إن بعضها يساهم في توليد الأمطار الحامضية. أما ثاني أكسيد الكربون فيقول المختصون إنه واحد من الغازات التي تسبب الاحتباس الحراري في جو الأرض، وهذا بدوره يؤدي إلى الدفيئة التي نرى آثارها الآن في ذوبان الجليد القطبي وارتفاع معدل درجة حرارة الأرض بصورة عامة، ما قد تكون له آثار مدمرة على التنوع الحيوي وعلى تغير المناخ وزيادة التصحر ونقص المساحات المزروعة وقلة غذاء الإنسان الذي تتزايد أعداده.

إذاً، على الإنسان رغم توفر موارد يعتقد أنها كافية من المصادر الأحفورية للطاقة أن يجد بدائل لها إذا ما أراد أن يستمر على نمط الحياة المتعارف عليه، وإذا ما أراد أن يضمن استمراريتها للأجيال القادمة، وهذا ما يسعى إليه فعلاً وما يعرض هذا الكتاب

أنواعه وسبله. وإذا ما نجح الإنسان أو لنقل جيلنا هذا في تحقيقه فسيكون قد ضمن المستقبل لنفسه وللأجيال القادمة.

والأهم من هذا كله هو تخليص الإنسان من الأنانية والجشع. فإذا ما استمررنا نطلب سيارات أكبر وأسرع وعُدداً كهربائية تعمل كل شيء من غسل أواني الطعام إلى غسل الملابس إلى القيام مقام فرشاة الأسنان اليدوية، فسنستهلك قدراً أكبر من الطاقة، والمفارقة هي أننا نخترع ونسوِّق هذه العُدد لتخلصنا من بذل أي نوع من الجهد، ونصاب بعد ذلك بالترهل والسمنة وأمراض القلب والشرايين وداء السكري، ثم نعاود الكرّة لنخترع عُدداً أخرى ميكانيكية وكهربائية ونقوم بتصنيعها مستخدمين مواد خام وطاقة إضافيين ثم نستخدمها والعديد منها تعمل بالكهرباء أو تستهلك طاقة للتخلص من آثار استبدال جهد أجسامنا بالطاقة.

وسلوكية الدول ليست أقل أنانيةً من البشر كأفراد. فرغم اتفاق العلماء على وجود مترتبات ضارة للاستخدام المفرط للطاقة في كوكب الأرض وبعض هذه المترتبات لا يمكن عكس أثره، إلا أن بعضاً من الدول خرج عن الإجماع الدولي، لا بل نكص بعد أن وافق مبدئياً على جملة أفعال اتُفِق عليها في مؤتمر كيوتو الذي عقد في اليابان عام 1997 لمعالجة هذه الآثار. ومن أول هذه الدول الولايات المتحدة. غير أن هذه السلوكية أصابت الآخرين الذين لم يستطيعوا الاتفاق حتى على منهاج عمل لوضع حل لهذه المشاكل في مؤتمر كوبنهاغن الذي عقد في أواخر عام 2009 الذي كان الكثيرون يعلقون عليه الآمال الكبيرة.

هل الصورة قاتمة إلى هذا الحد؟ إن لم تكن قاتمة فهي ضبابية وفيها عتمة، ونحن بحاجة قبل كل شيء إلى بعض التغيير في نمط حياتنا وفي أسلوب التفكير لنستطيع التكيف مع الواقع الذي بدأ يفرض ذاته علينا. إن الطَرق المستمر وبخاصة على الأطفال الصغار في مناهج الدراسة وفي البرامج التلفزيونية ومن قبل المنظمات البيئية مثل السلام الأخضر وغيرها ربما سيساعد في تثقيف الجيل القادم ليبدأ بالاستغناء عن بعض الرفاه المكلِف الذي اعتاده جيلنا مؤخراً موفراً بذاك المواد الخام والطاقة، مؤمّناً مستقبلاً أفضل للأجيال التي تلينا.

صباح صدّيق الدملوجي

مقدمة

كان هذا الكتاب في الأصل قد وضع لمنهاج عن المضامين الفلسفية والاجتماعية لتكنولوجيا الطاقة الحديثة التي كنا ندرّسها في جامعة البولي تكنيك في بروكلين بنيويورك. وكان المنهاج قد استُحدث كجزء من برنامج في العلوم والتكنولوجيا والمجتمع وضعته البولي تكنيك في بداية الثمانينيات مع دعم من مؤسسة أندرو ميلون. وأصبح برنامج البولي تكنيك جزءاً من حركة (العلوم والتكنولوجيا والمجتمع) التي ضمت أكثر من مئة كلِّية وجامعة. وكان هدف الحركة مساعدة طلاب الإنسانيات والعلوم الاجتماعية في الحصول على قدر مما يدعى أحياناً (محو الأمية التكنولوجية) – وهي المقدرة على تناول التكنولوجيا الحديثة بطريقة نقدية.

وتجاوز استخدام هذا الكتاب بعد ذلك برامج العلوم والتكنولوجيا والمجتمع إلى برامج في السياسة العامة. وتتطلب هذه البرامج أيضاً التحري عن التكنولوجيا وفق مقياس واسع ينظر في قضايا السياسات. ورغم أن هذا الكتاب قد وضع كمرجع لمناهج العلوم والتكنولوجيا والمجتمع، إلا أن أهدافه هي ذاتها الموجودة في مناهج السياسات العامة: وهي تطوير مهارات التفكير النقدي حول التكنولوجيا. ونحن لا نقدم فقط المشاكل التي تثيرها تكنولوجيا الطاقة، بل نتعداها إلى الأسس التقنية والفلسفية اللازمة لتقييم الحلول المطروحة.

ونتجنب في معظم الأحيان التأييد أو وضع القواعد، ونحاول بدل ذلك استخراج القيم الكامنة التي تحيط بالخيارات التكنولوجية، وبهذا يوضع الطلاب أمام تحدٍ للبحث عن إجابات بأنفسهم. ونعتقد أن الإجابات المتسرعة سوف تحد النفع من هذا الكتاب وذلك بسبب كون قضايا الطاقة معقدة ولها تأثيرات ربما تمتد إلى عدة أجيال في المستقبل.

التكنولوجيا نتيجة ذلك ليست بطلاً ولا شريراً. فالتحليل النقدي لا يتفق مع الحلول المبسَّطة، لأن كل الحلول التكنولوجية لها نتائج اجتماعية. ويترتب على الأسلوب النقدي أن يتعامل بدرجة الشك نفسها مع النظرة إلى التكنولوجيا كقوة اجتماعية مؤذية، حيث ينظر إلى التقدم التكنولوجي كقوة تقرر لذاتها وتكون مرادفاً للتجريد من الصفات الإنسانية. وللتكنولوجيا بالطبع تأثير رئيس في المجتمع ويحق للناس التخوف من احتمال فقدانهم استقلالهم الذاتي وحريتهم خلال مسيرة التطور التكنولوجي. ويغوص كتابنا في هذه القضايا ويتساءل عن إمكانية استخدام التكنولوجيا من غير أن تقوم هي باستخدامنا، وكيف يمكن لنا تكييف مؤسساتنا للتحكم بالتكنولوجيا بدل أن تقوم بتدميرها، وكيف يمكن فهم وتقييم منافع التكنولوجيا مقابل تكاليفها. هذه الأسئلة هي أساس النقاش حول تكنولوجيا الطاقة وهي ستواجه الطلاب في السنين التالية.

ولكي يتمكن القارئ من إعطاء القضايا التي يثيرها هذا الكتاب حق قدرها، يجب عليه امتلاك أسس علم الفيزياء بمستوى برامج العلوم لطالب المدارس الثانوية من غير التخصصات العلمية. ومع ذلك فإن الكتاب يوفر ملحقاً (الملحق أ) عن (الأسس العلمية) يبدأ مراجعته بتعاريف مبدئية. ونعتقد أن شخصاً عادياً يمتلك بعض المعرفة العلمية سيتمكن من الإمساك بالمفاهيم الأساسية للكتاب من دون أن يأخذ البرنامج المطلوب مسبقاً.

ويستخدم الكتاب أيضاً مفاهيم من الفلسفة الأخلاقية والاجتماعية. وكان معظم الطلاب الذين شاركوا في برنامجنا قد درسوا قبل ذلك مقرراً تعليمياً في الفلسفة، أما الآخرون فكانوا قادرين على المشاركة في النقاشات الصفية بمساعدة بعض النصوص الفلسفية الأساسية. وقد أُعطيت القراءات المقترحة في أسس الأخلاقيات والعدالة في قائمة المراجع للملحق (ب).

تحتاج قضايا الطاقة إضافة إلى ذلك إلى بعض مفاهيم العلوم الاجتماعية، وبخاصة الاقتصاد وإلى مفاهيم علم الاجتماع وحتى علم النفس. غير أننا لا نفترض على أي حال معرفة مسبقة بهذه المواضيع. وربما سيكون بمقدور طالب يمتلك معرفة مسبقة بالاقتصاد أن يغطي المادة بسرعة أكبر، لكن المفاهيم التقنية في الاقتصاد يجري

شرحها في النص. لذا فإن الافتقاد إلى التدريب المنهجي في الاقتصاد يجب ألا يكون مانعاً لفهم قضايا تكنولوجيا الطاقة.

وكان الهدف الأصلي للكتاب رفع مدى استيعاب طلاب الإنسانيات والعلوم الاجتماعية للتكنولوجيا. ووجدنا في الوقت ذاته أن المقرر التعليمي في البولي تكنيك كان مفيداً وثميناً لطلاب الهندسة والعلوم الفيزيائية. وقد وجدوا بالطبع المادة العلمية بسيطة نسبياً رغم أنهم كما يبدو اكتسبوا فهماً أعمق للثيرموديناميكا من خلال التطبيق المباشر للقواعد العلمية في قضايا محددة للطاقة. والأكثر أهمية هو أن هؤلاء الطلاب حصلوا على منظور فلسفي واجتماعي ذي شأن عن التكنولوجيا التي سيساعدون يوماً ما على تطويرها.

ورغم أن هذا الكتاب كان قد وضع في الأساس ككتاب مرجعي لطلاب (العلوم والتكنولوجيا والمجتمع) إلا أننا وجدناه ذا فائدة كمرجع إضافي لمقررات دراسية أخرى. وقد استخدمنا جزءاً منه بنجاح في مقررات لطلاب دراسات عليا في سياسات الطاقة أعطي لطلاب الهندسة والاقتصاد وإدارة الأعمال. ونعتقد أنه سيكون ذا فائدة أيضاً للمقررات الدراسية ذات العلاقة بإدارة التكنولوجيا أو بنظم الصحة والسلامة.

ويغطي الكتاب كمدخل إلى الطاقة مجالاً واسعاً من المواضيع. وهو مقسّم إلى ثلاثة أجزاء. يبحث الكتاب في القسم الأول القضايا الأساسية المرتبطة بالموارد والطلب على الطاقة وأسس تحويل الطاقة الحرارية التقليدية (وهناك فصل عن التحويل الحراري لأن 95 في المئة من طاقتنا مشتقة من عمليات حرارية). وينقب الكتاب في الجزءين التاليين في تكنولوجيات محددة – حالية ومستقبلية - والقضايا المهمة المرتبطة بها. ونحن نبحث في كافة الحالات عن تعميق فهم الطلاب لكيفية عمل هذه التكنولوجيات وأيضاً عن الآثار التي تتركها على المجتمع.

ويؤكد الكتاب قيم الفهم الكمي، وكذلك الفهم النوعي لقضايا الطاقة. ففي حين نحاول تجنب المعادلات الرياضية المعقدة، نقوم بإدخال الوحدات المناسبة [مثل (الكواد) لقياس الاستهلاك الكلي للطاقة على المستوى القومي أو الدولار لكل مليون وحدة حرارية بريطانية كمقياس للكلفة]، وذلك لكي يتعود الطالب على القياسات الكمية. ولا تقتصر فائدة هذا التوكيد على مساعدة القارئ على الإمساك بصورة كاملة

بالقضايا التكنولوجية وحسب، بل يكون ذا أهمية في النقاش الاقتصادي والفلسفي لا سيما في ما يتعلق بقياس مقادير الخطورة والمنفعة الاجتماعية (الملحق ب).

يُعتبر توقيت الحقائق ذا أهمية عندما تتعامل مع قضايا مثل سوق النفط العالمية أو القدرة النووية أو تطوير التكنولوجيات الجديدة. وكان أسلوب تناولنا للقضية هو أن نتحاشى التوقيت الزمني في النقاش قدر الإمكان. فقد شهدت السبعينيات والثمانينيات تغيرات مفاجئة وشديدة الأثر في القدرة على فهم قضايا الطاقة (وكما سنرى فإن الكثير من المعطيات التي نستخدمها مأخوذة من تلك الفترة. فإجراءات التقشف الحكومية في الولايات المتحدة مثلاً في الثمانينيات والتسعينيات لم تشمل البحوث في تكنولوجيا الطاقة فقط بل قللت من جمع المعلومات عنها أيضاً). وعند إصدار الطبعة الثانية للكتاب في نهاية التسعينيات، لم تتحرك الأحداث بتلك السرعة لكن سرعة التغير في السابق تبين مقدار الخطأ الناتج من الاعتماد على آخر عناوين الأنباء للحصول على نظرة عامة عن قضية الطاقة. وقد تم اللجوء إلى عدد من المراجع لتحديث المعلومات عن تطورات الموارد والاقتصاد والتكنولوجيا. ولم نقم في مثل هذه الحالات إلا بالإشارة باختصار إلى هذه المراجع وإلى تواريخها ـ فمسؤولية اختيار المعلومات من هذه المراجع تقع علينا.

ونود أن نعرب عن تقديرنا لعدد من الناس لمساعدتهم في إعداد هذا الكتاب في الأصل. ونشكر في المقدمة دونالد هوكني وكارل ميتشام اللذين وفرا لنا، كإداريين في برنامج الفنون الحرة المعاصرة في جامعة البولي تكنيك، التشجيع والدعم والوقت لإصدار الطبعة الأولى للكتاب.

والمؤلفان مدينان لعدد من زملائهم في البولي تكنيك الذين تكرموا بقراءة أجزاء من الطبعة الأولى وعلقوا عليها أثناء تقدم العمل وهم: دونالد هوكني ووالتر كيشنيك وكارل ميتشام وويرنير مولر وروموالدوس سفيدريس ونانسي توني. ونود أن نشكر آخرين ممن قرأوا جزءاً من الكتاب أو كله وهم جون باير وبارل دوربن من جامعة ديلاوير وبيتر ميير من جامعة ولاية نيويورك سابقاً وستيفن هوفمان من كلية سانت توماس وتيودور كابيكا من برنامج الأمم المتحدة للتنمية وجوشوا كاي من شركة غاز وكهرباء الباسفيك سابقاً واثنان من المراجعين غير المعروفين وكانت تعليقاتهم جميعاً مرحباً بها وذات قيمة كبيرة.

ونود أن نعترف بالمساعدة التي أبداها أشخاص ومنظمات في توفير المعلومات وفي الإجابة عن أسئلة ذات علاقة بالقضايا موضوعة البحث في هذا الكتاب. فنحن نريد أن نقدم شكراً خاصاً لخاييم باروخ من معهد بحوث القدرة الكهربائية، وتيد فلاناغان من معهد جبال روكي، ومو داسار عمران من البنك الدولي، وتشارلز كومانوف من كومانوف أسوسيتس في نيويورك. ونعترف أيضاً بفضل كونمو تشونك من شركة الطاقة الكهربائية الكورية سابقاً وهو زميل سابق في البولي تكنيك أثار اهتمامنا في مشكلة الطاقة خلال السبعينيات. كما نشكر أيضاً لورنس برنغل لإرشاداته في الحصول على المخططات.

ونود أخيراً توجيه الشكر للناشر بيتر جون ليوني من مطبعة جامعة كامبريدج لإرشاداته وتفهمه أثناء إخراج الطبعة الأولى، وإلى مات لويد لرعايته الطبعة الثانية حتى تاريخ إخراجها. كما نشكر أيضاً السيدة فرانسيس نيكس لقيامها بتحرير الطبعة الثانية بصورة كاملة.

القسم الأول
مصادر وتكنولوجيا الطاقة

الفصل الأول

مقدمة

أزمة الطاقة – تشرين الأول/ أكتوبر 1973

بدأت أزمة الطاقة بأسلوب درامي. فنتيجة الحرب التي اندلعت بين العرب والإسرائيليين قطع العرب فجأة كل شحنات الوقود إلى حليف إسرائيل أي الولايات المتحدة. وعانى الأميركيون في الأسابيع التالية مشقة لم يعرفونها سابقاً، وكان ملايين الناس في أنحاء البلاد كافة مجبرين على الجلوس في سياراتهم يومياً منتظرين تعبئتها بالبنزين. فقد اعتبر الناس في الولايات المتحدة منذ الحرب العالمية الثانية الحصول على مصادر رخيصة للطاقة ـ وبخاصة النفط ـ أمراً بدهياً وأصبحوا مجتمعاً مستهلكاً للطاقة. أما الآن فهناك شح في الطاقة في كل مكان.

كان للحظر آثار أكثر خطورة من مجرد المشقة التي أوحت بها صفوف الانتظار في محطات التعبئة بالوقود. فقد بدأ الأميركيون يدركون حجم كمية الطاقة التي يحتاجون إليها. وامتلأت الصحافة فجأة بإحصائيات مدهشة عن ملايين البراميل التي تستهلكها الولايات المتحدة كل يوم ـ وكم من النفط تستهلك أكثر مما يستهلكه بقية العالم. وكانت الصدمة الكبرى أن جزءاً كبيراً من ذلك النفط كان مستورداً وأن مصادر الطاقة الأميركية كانت تخضع لسيطرة آخرين وأنه من الممكن إيقافها في أي لحظة وفي أي وقت. وبدأ فهم الناس للطاقة والعالم يتغير. ولم يكن ذلك سوى البداية.

وانتهى الحظر لكن الأزمة لم تنته. وقد توالت أزمات الطاقة في فترة السبعينيات ولم يقتصر ذلك على الولايات المتحدة، بل شمل العالم كله. وكان هناك شح أيضاً في

الغاز الطبيعي عام 1976. وبدأنا نسمع توقعات متشائمة تُنذر بأن بعض المصادر ستُستهلك في المستقبل القريب جداً.

كان هناك رفع مستمر للأسعار. وارتفع سعر النفط الذي كان ثلاثة دولارات للبرميل في بداية العقد إلى أكثر من ثلاثين دولاراً عند نهايته ولم تكن هناك نهاية واضحة لارتفاع الأسعار. وبدا أن منظمة الأقطار المصدرة للنفط (أوبك OPEC) التي تحكمت بأغلبية احتياطيات النفط في العالم تتحكم أيضاً بأسعار النفط وأنها كانت عازمة على رفع السعر بصورة غير محدودة. ولم تتضح الكيفية التي يمكن بواسطتها منع أوبك من تحقيق ذلك إلا لعدد ضئيل من اختصاصيي الطاقة. وتوقع المحللون أن يكلف النفط 80 دولاراً أو أكثر في عقد الثمانينيات. وقد ارتفعت أسعار الكهرباء وكان أحد أسباب ذلك ارتفاع أسعار النفط والغاز والفحم. أما السبب الآخر فهو كلفة بناء محطات توليد كهرباء بديلة لا تعمل بالنفط أو الغاز أو الفحم، بل بالوقود النووي. وأصبحت الطاقة النووية التي كانت تعتبر في ما مضى موفِّرة للكلفة كارثة اقتصادية كما يبدو.

وما زاد الأمر سوءاً أن استخدام الطاقة هذه، وهي الوسيلة التي ابتدعت المجتمع الصناعي وحافظت عليه أصبح يُنظر إليها الآن على أنها مشكلة بحد ذاتها. فلم تقتصر حاجتنا للطاقة على الوصول بنا قريباً إلى اليوم الذي تستنفد فيه المواد ـ من خلال حرق الوقود ـ بل إنها أوجدت تلوثاً أثّر في أرضنا وهوائنا ومائنا وفي صحتنا. ومع نهاية العقد أعلن الرئيس جيمي كارتر أن أزمة الطاقة كانت «المعادل الأخلاقي للحرب» وتحدى الأمة لمحاربتها وإيجاد الحلول.

وقد تحدَّت فترة أزمة الطاقة هذه العالم برمته. وقد شكلت بالنسبة إلى الأميركيين مجموعة واسعة من المآزق. فقبل الأزمة لم يقتصر الأمر على افتراض الناس وجود موارد زهيدة الثمن للطاقة، بل إنهم افترضوا أيضاً سير المجتمع التكنولوجي بطريقة سلسة ومستمرة. وكان الناس متفائلين حول قدرة التكنولوجيا على جعل حياة كل فرد أفضل وأكثر ثروة. لكن الواقع لم يكن بتلك البساطة. فقد بدت التكنولوجيا على حين غرة غير أكيدة ومشوبة بالخطر ومكلفة. ولم يكن واضحاً ما إذا كانت التكنولوجيا هي المشكلة أم الحل.

وأوجدت أزمة الطاقة فترة من الاضطراب الاقتصادي كذلك. فحاجة الأمم الصناعية إلى مصادر الطاقة قد ينتج منها تحوُّل كبير في الثروة إلى مصدري النفط وعدم استقرار اقتصادي لبقية العالم نتيجة ارتفاع أسعار الطاقة. وحدث ركودان اقتصاديان ملحوظان خلال فترة الأزمة وكان هناك خوف من أن الضائقة الاقتصادية ستزداد شدة في السنين التالية.

كانت أزمات الطاقة مع ذلك أكثر من ظواهر تكنولوجية واقتصادية. فقد كانت ظواهر سياسية واجتماعية أيضاً. وقد غيرت الأزمة طريقة الفهم السياسي. وواجهت حكومة الولايات المتحدة الابتزاز السياسي على هذه الشروط: لا دعم، لا نفط. وقاومت الولايات المتحدة في فترة الأزمة في السبعينيات الضغوط وتحملت بعض الصعوبات نتيجة ذلك لكنها استفادت من عدم دعم كافة أعضاء أوبك للحظر – وذلك ما قوَّض آمال الحكومات العربية – بل إن البعض استفاد منه في الحقيقة للحصول على حصة أكبر من سوق الولايات المتحدة. لكن هذا لم يقلل من شعور الأميركيين بنقطة ضعفهم. فماذا ستكون النتيجة مستقبلاً إذا ما اتفقت حكومات الأوبك على العمل سوية؟ ربما سيكون على الولايات المتحدة الاختيار بين تشغيل مصانعها ومتابعة السيطرة على سياستها الخارجية. ولم يكن ذلك خياراً أراد الناس مواجهته.

وأخيراً فإن فترة أزمة الطاقة تحدَّت سكان العالم الصناعي للتفكير بطريقة عيشهم الحالية وكيفية العيش في المستقبل. هل يمكننا الاستمرار باستهلاك مقدار الطاقة نفسه الذي نستهلكه؟ وماذا سيعني استهلاك قدر أقل؟ وهل نحن مستعدون لتبديل نمط حياتنا؟ وهل نحن مستعدون لركوب سيارات أصغر والحصول على تدفئة أو تبريد أقل واستخدام عدد أقل من الأدوات الكهربائية وأن نعيش حياة تكنولوجية أبسط؟

إن هذه الخيارات، كما لاحظ عدد من الفلاسفة في حينه لم تكن ببساطة أموراً تتعلق بالناحية العملية وحسب. فأنماط استخدامنا للطاقة حملت معها مترتبات أخلاقية كما حملتها أي حلول تبناها المجتمع لاستباق أي أزمة طاقة مستقبلية. فهل أنماط حياتنا في الغرب الصناعي ذات التوجه الاستهلاكي هي اعتداء على عدالة التوزيع العالمية مثلاً ؟ أي هل لنا حق أخلاقي لاستخدام قدر أكبر من الوقود

الأحفوري من سائر شعوب العالم؟ وهل التلوث الذي انبعث من عندنا أمر يمكن الدفاع عنه، بل هو تهديد ليس لكل سكان العالم اليوم، بل ربما لأجيال قادمة؟ لكن إذا ما طلبت الحكومة تغييراً في أسلوب حياتنا أو وقفاً للصناعات الملوثة ألن ينتهك ذلك الحريات الشخصية؟ كانت هذه الأسئلة موضع نقاش في السبعينيات في العديد من الاجتماعات العامة. ورغم عدم وجود إجابات سهلة لها في حينه إلا أن الوصول إلى إجماع للرأي حولها بأسرع فرصة ممكنة بدا أمراً فائق الأهمية.

لكن الموقف انقلب رأساً على عقب.

ما بعد الأزمة إلى...؟

رغم أن العالم الصناعي كما سنرى في الفصل الرابع بدأ لفترة يستخدم قدراً أقل من الطاقة إلا أن الإجماع على القضايا الأخلاقية الأكبر لم يحصل. وبدلاً من ذلك تضاءل النقاش حولها. وانتهت فترة أزمة الطاقة بصورة فجائية مثلما بدأت. وبدا أنها تلاشت. وهبطت أسعار برميل النفط التي كان متوقعاً لها أن تصل من 80 دولاراً إلى ما دون 15 دولاراً وكان هناك عرض يتجاوز الطلب – تخمة في النفط والغاز. وفقدت أوبك سيطرتها على السوق وحتى على أعضائها. وكانت حصص الإنتاج التي حددتها أوبك لغرض دعم الأسعار تنتهك باستمرار من قبل الدول الأعضاء التي كانت تخشى فقدان أسواقها بصورة كلية لدول ليست أعضاء في الأوبك مثل المكسيك والنرويج. وفقدت أوبك عملياً احتكارها للسوق.

وكان هناك نوع من الشعور وبخاصة في الولايات المتحدة أن الأزمة لم تكن إلا وهماً. وتبين أن إدارة ريغان اعتبرتها في أحسن الاحتمالات فترة فاصلة غير ذات أهمية. وجرى تشذيب البرامج الحكومية لتطوير المصادر البديلة للطاقة أو إلغاؤها تماماً. ولم يكن هناك أسلوب سياسي جديد للتعامل مع القضايا الاجتماعية والأخلاقية الأكبر، ولم يبدُ أن هناك ضرورة لذلك في الحقيقة. ومع نهاية عقد الثمانينيات بدأ استهلاك الطاقة يتزايد ورغم ذلك استمر انخفاض الأسعار والفيض في الإنتاج. وبدا أن الأزمة انتهت وأن القضية حُسمت.

لكن هل كان ذلك صحيحاً؟ فالأزمة المباشرة انتهت لا شك في ذلك لكن

الاختلاف استمر حول مدى الاستقرار. لقد بدا وفق كل المقاييس أن أيام الطاقة الوفيرة الرخيصة القديمة قد عادت. وبدت الأسئلة التي طرحت في السبعينيات غير واردة في عالم فيه تخمة من الغاز والنفط.

لكن العديد من الناس لم يقتنعوا بالمظاهر. وبدت المقالات بالظهور في الدوريات العلمية والصحافة الشعبية وهي تحاول إقناعنا بأن أزمة جديدة تلوح عما قريب (انظر مثلاً كراوفورد (Crawford) 1987، وهيرش (Hirsh) 1987).

تبعاً لهذا المنظور، فإن الوقود الأحفوري كان يُستنفد (لكن بوتيرة أبطأ مما توقعته الصحافة في السبعينيات)، وأن الاستهلاك المتزايد كان سيؤدي إلى أزمة جديدة في التسعينيات أو بعد ذلك. وحاول هؤلاء المراقبون أن يقنعونا بأن على الناس أن يفكروا بفترة ما بعد الأزمة السابقة وعلى العمل لاستباق الأزمة التالية. وإذا تهاون المجتمع في كل ذلك كما أعلنوا فإن ذلك قد يؤدي إلى حدوث أزمة أخرى قريباً. وستكون الثانية أشد أثراً من الأولى التي واجهناها.

نظرة إلى الوراء

من هو الذي على صواب؟ هل أصبحت أزمات الطاقة شيئاً من الماضي، أم هل سنتوقعها في المستقبل أيضاً؟

رغم عدم إمكانية الإجابة عن هذا السؤال بطريقة قطعية، فإننا نعلم بأن فترة السبعينيات رغم كونها فريدة في تجاربنا إلا أنها ليست فريدة في التاريخ. فأزمات الطاقة قد حدثت في ما سبق وبعضها قد استغرق الجزء الأكبر من قرن كامل وكان لها أحياناً تأثير مثير طويل الأمد في العالم.

فالمصريون القدماء مثلاً عانوا كما يبدو مشكلة طاقة طويلة الأمد. وفي محاولة لتأمين خشب الوقود وسَّعوا إمبراطوريتهم أكثر فأكثر نحو الجنوب. وقادهم بحثهم عن مصادر الطاقة بعيداً عن البحر المتوسط وهو مركز حضارتهم ودفعهم في عمق متزايد إلى أدغال أفريقيا. وقد توسعوا أكثر مما يجب كما يقول بعض المؤرخين. وأدت هذه الحركة إلى أفول نجم المصريين في العالم القديم (LeBel 1982).

ربما تكون إحدى أزمات الطاقة الحديثة قد أدت إلى نشوء أمة وإلى نشوء الحضارة التكنولوجية الحديثة ذاتها. كانت إنجلترا في القرن السادس عشر تتصحر بسرعة. ولم يقتصر استخدام الخشب على الطاقة ـ بل تعداه إلى البناء ـ وكان الخشب أيضاً الوقود الأول في ذلك العهد وساهمت الحاجة إلى الوقود في أزمة الأخشاب بصورة واضحة. وكان الوقود الخشبي يُستخدم في عدد من الصناعات المهمة مثل صنع الزجاج وصهر المعادن واستخراج الملح من ماء البحر. ودامت هذه الأزمة نحو قرن من الزمن وعبَّد الإنجليز الطريق أثناء سعيهم إلى إنهاء الثورة الصناعية (Nef, 1977).

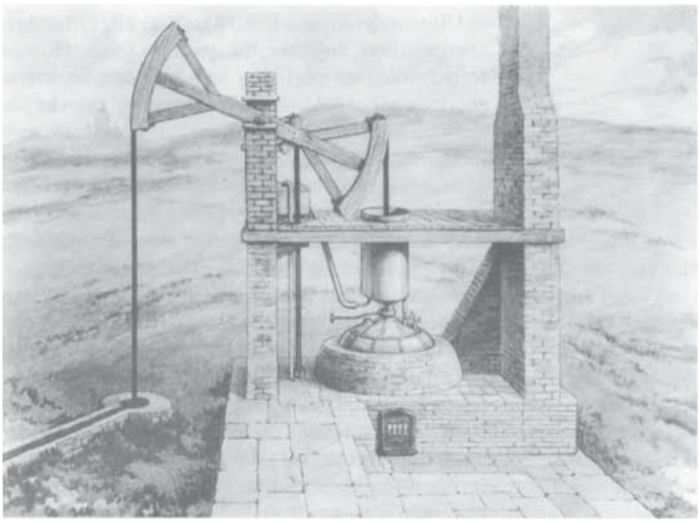
كان لدى الإنجليز مصدر للطاقة بديلاً من الخشب وهو الفحم. وكان الفحم متوافراً بحيث إن بعض عروقه كانت ظاهرة على سطح الأرض في بعض المواضع، كما كان يُستخدم وقوداً منذ زمن الرومان. وكان للفحم عيوبه التي حدَّت من استخدامه وفي مقدمها دخانه القذر. وأدى ذلك إلى قدر كبير من التلوث بحيث إن استخدامه مُنع في لندن في القرن الرابع عشر. والأهم من هذا أنه كان وقوداً صناعياً رديئاً. فقد نتج من بعض مكونات الدخان منتجات صناعية كانت في أحسن الأحوال غير نقية كما كانت في أسوء الأحوال غير صالحة للاستخدام.

لقد أدت الحاجة إلى إيجاد بديل من الخشب إلى تقدم في تقنيتين ملحوظتين. فقد جرى **أولاً** تطوير الفرن العاكس وهو عبارة عن كرة مفرغة يسبّب شكلها انعكاس الحرارة في داخلها ـ مما يرفع درجة الحرارة وينتج منه احتراق أنظف. وبذلك قد أصبح بالإمكان الآن استخدام الفحم بدلاً من الخشب في معظم الاستخدامات الصناعية وكان ذلك قد تحقق مع نهاية القرن السادس عشر.

كان الابتكار **الثاني** قد برز بسبب الحاجة إلى زيادة إمدادات الفحم. فالمصادر السطحية سرعان ما استنفدت واحتاجت المصادر الأخرى إلى استخراجها من باطن الأرض. غير أن المناجم كلما تغلغلت إلى أعماق أكثر كانت المهمة أصعب. وإحدى المشكلات الصعبة جداً كانت تسرب المياه في مهوى المنجم. وتطلب ذلك، البحث عن طرق أفضل لضخ الماء إلى الخارج. وطوّر توماس نيوكومين (Thomas Newcomen) وهو مخترع إنجليزي عام 1705 أداة للضخ تستمد قوتها من

البخار الذي كان ينتج من حرق الفحم (انظر الشكل 1.1). وكان محرك نيوكومين (Newcomen Engine) يُستخدم بصورة واسعة طوال القرن الثامن عشر. والأهم من ذلك أنه كان أول استخدام عملي للمحرك البخاري. لقد كان بالطبع محركاً بخارياً (إنما بهيئة مختلفة) والذي وفَّر الطاقة للثورة الصناعية في ما بعد.

ما هي الدروس التي تقدمها لنا أزمات الماضي؟ فالتجربة الإنجليزية يمكن أن تزودنا بدرسين مختلفين ومتناقضين.



الشكل 1.1: محرك نيوكومين

المصدر: Babcock & Wilcox Co.

فاستمرار الأزمة الإنجليزية لفترة طويلة يجعلنا، من ناحية، خائفين من عدم توقع إجابات سريعة لمشاكل الطاقة الصعبة. لكن النتيجة النهائية قد تشجعنا لكي نثق بقدرة التكنولوجيا على إيجاد الحلول. قد توحي قصة أزمة الطاقة الإنجليزية بمستقبل يوفِّر فرصاً للعمل ودليلاً على عبقرية الإنسان. وتوحي التجربة المصرية في الوقت ذاته بأن ندرة مصادر الطاقة من دون التفكير بابتكارات ناجحة يمكن أن تؤدي إلى هلاك الحضارة.

بالطبع ليس هناك تشابه تاريخي جزئي كامل فهناك اختلافات مهمة اليوم. فنحن

معتمدون بدرجة أكبر بكثير على الطاقة الوفيرة التي يتعين علينا الحصول عليها الآن. ولا نستطيع انتظار الابتكارات قرناً كاملاً مع إدامة أسلوب حياتنا الحالية. فالتكنولوجيا قد تكون واعدةً لكن ما من ضمان حول إمكانية وتوقيت ذلك. قد يكون هناك سبب جيد للتفاؤل، لكن يجب عدم توقع الإنقاذ من التكنولوجيا «كتوقع الإنقاذ من فارس يطل من خلف التلال»، كما قال أحد إداريي الصناعة النفطية. وللتكنولوجيا مخاطرها مثلما لها ثمارها. فالعلماء عبَّروا عن مخاوفهم حتى أثناء مواجهة ما يبدو أنه تخمة في مصادر الطاقة من أن تؤدي شهيتنا الواسعة لمصادر الطاقة تخلق مستويات من التلوث لا يمكن تحملها وتجازف بتغيير المناخ على مستوى الكون.

التفكير حول قضايا الطاقة

لا توجد إجابة موحدة لمسائل الطاقة في السنين القادمة، كما إننا لسنا متأكدين حتى من نوع الأسئلة ذاتها. إنما من المؤكد بروز تحديات وربما أزمات أيضاً. وستحتاج بعض الأسئلة إلى إجابات قاطعة وفاعلة من كل فرد في مجتمعنا وربما في عالمنا. وستؤثر هذه القضايا في ثروتنا وفي نمط حياتنا وصحتنا وفي أطفالنا.

وهذه القضايا تعنينا في النهاية جميعنا. ومع ذلك سيطرح من ليسوا خبراء في مجال الطاقة السؤال الآتي: كيف يمكن للمرء أن يوفِّر إجابات لقضايا تكنولوجية من غير أن يكون مهندساً أو عالماً أو محلل طاقة؟ لكن تكنولوجيات الطاقة، وكما سنبحثها في الفصول القادمة، رغم كونها معقدة أحياناً لا تتجاوز فهم الفرد العادي. والأهم من ذلك، أننا سنرى أن تحليل قضايا الطاقة يجب أن يتجاوز النطاق التقني البحت. فقضايا الطاقة وسياستها مسألة اجتماعية وفلسفية. والتكنولوجيا لا تقف وحدها معزولة عن العالم. والحكم على موقعها في المجتمع وأهميتها بالنسبة إليه شأن كل فرد، بل واجبه لأن مثل هذا الحكم سيؤثر في طريقة عيشنا.

قد لا تكون الإجابات المحددة عن الأسئلة التي نواجهها اليوم عن الطاقة والتي سنواجهها غداً معروفة. ويجب أن نحصل على هذه الإجابات بعد تحليل كامل ووعي اجتماعي وفلسفي في المجالات التي ستُستخدم فيها تكنولوجيا وموارد الطاقة، وتقدير ذكي لما تعنيه قضايا الطاقة لطريقة عيشنا وللعالم الذي نعيش فيه. ولا يوفّر هذا الكتاب وصفة للمستقبل، وسيكون مطلبنا بدلاً من ذلك تقييم حاسم لقضايا الطاقة بما

فيها الموارد والتكنولوجيات والسلامة والاقتصاد والسلوكية وما إلى ذلك. وبهذه الطريقة فقط سنتمكن كمجتمع من إعطاء إجابات ـ عادلة وواضحة ـ عن الأسئلة التي ستطرح في السنين القادمة.

المراجع

Crawford, M. «Back to the Engergy Crisis.» *Science*: 6 February1987. pp. 626-627

Gever, J. [et al.]. *Beyond Oil*. Cambridge, MA: Ballinger, 1986.

Hirsch, R. L. «Impending United States Energy Crisis.» *Science*: 20 March 1987. pp. 1467-1473.

LeBel, P. G. *Energy Economics and Technology*. Baltimore, MD: Johns Hopkins Press, 1982.

Nef, J. U. «An Early Energy Crisis and Its Consequences.» *Scientific American*: October 1977. pp. 141-151.

الفصل الثاني

موارد الطاقة

مقدمة

يمكن تصنيف الموارد الطبيعية ضمن واحد من صنفين: موارد قابلة للاستنفاد وموارد متجددة. والموارد القابلة للاستنفاد هي تلك التي تستخدم بوتيرة أسرع مما تستطيع الطبيعة إعادة انتاجها أو استكمالها. ومورد الوقود الرئيس لدينا اليوم هو الوقود الأحفوري وبخاصة الفحم والنفط والغاز الطبيعي. وهذه الموارد لا يمكن فعلياً استبدالها أبداً لأن ذلك يستغرق مدة زمنية هائلة.

وهناك موارد أخرى يمكن استبدالها أو أنها غير قابلة للاستنفاد. فطاقة الماء والمواد النباتية (المدعوة الكتلة الحيوية) تجدد نفسها في الواقع إذا ما سمح لها، لذا فهي متجددة بالفعل. أما الأخرى مثل الطاقة الشمسية وقوة الريح فهي غير قابلة للاستنفاد، لذا فهي نوع «لا ينضب»، لكنها تندرج ضمن صنف المتجددة. وقد لجأ الناس في العصر قبل الصناعي إلى استخدام هذه الموارد المتجددة أولاً. فالخشب مثلاً كان الوقود المُستخدم للتدفئة أو الطبخ ووفَّرت الريح القدرة لتسيير السفن الشراعية وأدارت القوة المائية عجلة مطاحن الحبوب.

لكننا منذ بدايات العصر الصناعي بدأنا نعتمد وبصورة متزايدة على أنواع الوقود الأحفوري. وتستمد الولايات المتحدة 89 في المئة من الطاقة التي تحتاجها من الوقود الأحفوري بينما يبلغ الرقم في حالة العالم كله 80 في المئة.

وقد كرس العلماء ورجال الأعمال في السنين الأخيرة اعتباراً متزايداً لمصادر الطاقة المتجددة. لكننا وكما سنرى في الفصلين 10 و11 لسنا إلا في بدايات استخدام إمكانات الموارد المتجددة.

وبالرغم من اعتمادنا على الوقود الأحفوري، أو ربما بسبب ذلك فقد نشبت خلافات منذ الثورة الصناعية في القرن التاسع عشر. وكانت الأسئلة تثار باستمرار حول من يتحكم بهذه الموارد ومن يستفيد من استغلالها وعن النتائج البيئية لهذا الاستغلال. وكان الوقود الأحفوري موضوع جدل شديد وطويل المدى خلال عملية تحول الولايات المتحدة وأوروبا إلى مجتمعات صناعية.

وقد استمرت هذه النزاعات في الولايات المتحدة بصورة متقطعة لقرن من الزمن تقريباً ولها امتدادات يمكن تتبعها حتى يومنا هذا (Wildavsky & Tenenbaum, 1981). وأصبحت بعض هذه الامتدادات جزءاً من النسيج التاريخي الأوسع لهذا القطر مثل الحركة المضادة للاحتكار في العقود الأخيرة من القرن التاسع عشر والتي نمت لتصبح الحركة التقدمية في بدايات القرن العشرين. وكان أحد رموز هذا النضال السياسي جون د. روكفيلر وشركته ستاندارد أويل كومباني. فبعد اكتشاف النفط في بنسلفانيا عام 1859 آثار استحواذ ستاندارد السريع على عمليات الإنتاج والتكرير تهمة مفادها أن الشركة تحاول احتكار الطاقة. وأياً كانت حقيقة التهمة، فإن شركة روكفيلر كانت تتبع التوجه الأوسع في الصناعة حيث جرى تشكيل التكتلات الصناعية (Conglomerates) كما في صناعة الصلب.

وأدى رد الفعل الجماهيري ضد التكتلات التجارية، من بين نتائج أخرى إلى إقرار قانون شيرمان ضد الاحتكار (1890) وإلى نشوء الحركة التقدمية. وامتدت التقدمية إلى القرن العشرين مع كسر الاحتكارات الذي قام به الرئيس تيودور روزفلت (1901 – 1908) وترشيح روبرت لافوليت عام 1924 للرئاسة وكان يركز في حملته ضد الاحتكارات.

وجرى تفكيك ستاندارد أويل إلى عمليات متفرقة لكن ذلك لم يضع حداً لكل القضايا التي أثارتها احتكارات النفط. وكان أهمها مسألة السيطرة على الاستخراج واستخدام الموارد. وكان لدى شركة مثل ستاندارد القوة لتقرر مقدار النفط ومشتقاته التي تصل السوق. وهي تستطيع نظرياً أن تبقي المقادير أقل من الطلب لكي تبقي على الأسعار ومن ثم الأرباح عالية ولإدامة التجهيز لأطول فترة. وبعد تفكيك ستاندارد لم يعد بإمكان أي شركة واحدة امتلاك القوة للتحكم بإمدادات النفط بعد ذلك. ومع

ذلك فقد بقي الحفاظ على السياسات التي تخدم أهداف شركات احتكار النفط ضمن اهتمامات الشركات الجديدة.

وبالطبع سيكون أي تواطؤ أو أي محاولة مقصودة لحجب التجهيز إلى الأسواق من قبل الشركات مجازفة تؤدي إلى تدخل حكومي. والبديل من التواطؤ هو مواجهة منافسة من الشركات المستعدة لتجهيز السوق بالنفط عندما يحجمون هم عن ذلك. لكن هذه الحالة الجديدة تفترض اكتشاف موارد إضافية بكميات كافية وبكلفة رخيصة بحيث تستحق الإنتاج. وبعبارة أخرى فإن التحكم بالمعلومات عن الموارد يمكن أن يكون ذا أهمية ـ وأمراً حاسماً في سلوك السوق والحكومة. لذا فليس من الغريب أن معظم الجدل حول الموارد كان يتعلق بالمعلومات ـ ما الذي نبحث عنه، كيف نقرر ذلك، من سيتحكم به.

ويجب ألا نستغرب أيضاً أن من يعملون ضد الاحتكارات كانوا يتحدَّون طوال القرن العشرين تقديرات احتياطيات النفط (والغاز الطبيعي في ما بعد). فقد سيقت اتهامات لغاية سبعينيات القرن الماضي ضد صناعة النفط[1] من أنها قللت من تقديرات الاحتياطي النفطي وحتى إنها خططت لإحداث عجز في الإمدادات بهدف رفع الأسعار. وكانت هناك معلومات تدعم قضية الصناعة. لكن القضية بقيت بعيدة عن الحسم كما سنرى.

الخلافات حول تقديرات موارد الوقود الأحفوري

كم هو مقدار النفط (أو الغاز أو الفحم) المتوافر؟ وما هو مقدار المتوافر اليوم؟ علينا أن نؤكد في البدء أن تقدير كمية النفط الموجود وموقع وجوده ليس بالأمر السهل. فقد كانت التقديرات تأتي من الصناعة ذاتها غالباً ويتم تحديها بصورة روتينية. وهناك مجموعتان تعودان بأصولهما إلى القرن السابق كانتا ملحوظتين في مقاومتهما تقديرات صناعة النفط للموارد.

---

1 إن الصناعة ممثلة بمعهد البترول الأميركي (API) قد حافظت على لجان لتقدير احتياجات النفط والقابلية الإنتاجية منذ سنة 1920. كما جرى إنشاء نشاط مشابه بالنسبة إلى الغاز الطبيعي مؤخراً من قبل إتحاد الغاز الأميركي (AGA). وتعد المعلومات حول الاحتياطي وإحصائيات الإنتاج التي يوفرها API/AGA المصدر الرئيس لمثل هذه المعلومات لحكومة الولايات المتحدة عن النفط والغاز الطبيعي داخل القطر.

أولى المجموعتين هي ـ حركة المستهلكين ـ ذات الجذور في التقاليد التقدمية. فالمستهلكون لديهم اهتمام أكبر بنوعية وسعر المنتج مقارنة باهتمامهم بهيكلية الشركات. ورغم ذلك فقد كان هناك إحساس ضمني يكمن وراء عدم الثقة بالشركات الكبرى بما فيها الشركات النفطية. وفي نهاية القرن كانت القوة الكامنة وراء هذه الحركة الاجتماعية/ السياسية هي الخوف من انتقال كبير جداً للثروة إلى دوائر الأعمال الكبيرة ومن التحكم السياسي الذي يلاحظ.

أما الحركة المعاصرة الأخرى ذات الاهتمام بالموارد ـ فقد كانت الحركة الإيكولوجية ـ وهي حركة تعود بأصولها إلى حركة الحفاظية في القرن السابق، فالحفاظية (Conservationism) أو (Preservationism) حركة منفصلة عن التقدمية ولا تعتنق في الحقيقة أي أيديولوجيا سياسية. ووحدت حركة الحفاظية كما الحركة الإيكولوجية اليوم أفراداً من مختلف الأطياف السياسية ممن جمعتهم عقيدة الحفاظ على موارد العالم. ومن الغريب أن حركتَي المستهلكين والحفاظية رغم استنادهما إلى التقديرات الرسمية ذاتها، إلا أنهما يضغطان في اتجاهين مختلفين لكن لذات الهدف. وتطالب حركة الحفاظية بالاقتصاد في استخدام الموارد الطبيعية وبإبطاء وتيرة استخراج الوقود الأحفوري. أما حركة المستهلكين فكانت من ناحية أخرى تنادي بالحفاظ على أسعار متدنية من شأنها أن تشجع على زيادة استخراج الوقود الأحفوري في سوق غير مقيدة. بالنسبة إلى الحفاظية، فإن دعوة حركة المستهلكين إلى سوق حرة لم تكن في الغالب مقصودة لأن هؤلاء النشطاء غالباً ما يتجاهلون الأسئلة التي تطرحها السوق أو يعارضون حرية أكبر للسوق. ومع ذلك يبدو أن النتيجة المنطقية لبرنامجهم أسواق تتمتع بحرية أكبر. وقد أقرّت بعض مجموعات المستهلكين هذه النتيجة ضمنياً على الأقل وفضلت تحكماً حكومياً تاماً بالسوق وذلك للحد من الإنتاج أولاً، وللتحكم بالأسعار في الوقت ذاته. أما الحفاظيون فيميلون إلى الموافقة على تحكم أكبر في السوق ـ إن لم يكن من قبل الحكومة فمن قبل شركات النفط الكبرى التي ستميل إلى خفض الإنتاج لأن ذلك سيكون لمصالحها. وقد قيل «إن المحتكر خير صديق للحفاظي» وربما نستطيع إضافة: وأسوأ عدو للمستهلك.

ورغم أن مصالح الحركتين تبدو متباينة إلا أنهما اتفقتا على عدم ثقتهما في المعلومات العامة التي تصدر عن الصناعات المتعلقة بالموارد. وقد شعرت كلتاهما

بشكل خاص، أن البيانات التي تزودها الصناعة عن موارد الوقود الأحفوري هدفها خدمة الذات. وتبعاً لهذا المنظور، فإن الشركات ستقول إن تجهيزات النفط والغاز أقل مما هي عليه، لكي تحافظ على أسعار عالية كلما كانت مثل هذه التصريحات في صالح الشركات. أو قد يعلنون عن وجود كميات أكبر من النفط والغاز عندما يرغبون في تشجيع الطلب عليها أو للتأثير في تشريعات ملائمة.

وربما يكون أكثر تعابير الجمهور حدّة عن انعدام الثقة ما حدث أثناء شح البنزين في صيف 1979 وهو ما حث الحكومة على إصدار تقرير خاص[2] عن طريقة استخدام معلومات الصناعة. وتحدت مجموعات المستهلكين في هذا التقرير سرّية معلومات الصناعة النفطية بالنسبة إلى الموارد. وادعت شركات النفط كلٌ بمفردها أنها تحتاج إلى حماية المعلومات عن الموارد التي تمتلكها من منافسيها. وبرزت من خلال هذه القضية مسألة أساسية بالنسبة إلى الحكومة الديمقراطية. متى (ولماذا) يجب أن تعلن شركة خاصة عن معلومات قد تكون مضرة بمصالحها؟ إنه سؤال له مضامين قانونية وأخلاقية.

ومهما تكن صحة بيانات الصناعة ينبغي ألا ننسى أن الصناعات التي تتعلق بالموارد ليست المجموعات الوحيدة ذات الأجندة التي يمكن أن تؤثر في اختيار البيانات. كذلك فإن ذات المجموعات التي تتحدى الصناعة لها ميولها ونزعاتها. وهناك كما سنرى آخرون بالإضافة إلى الشركات النفطية وضعوا تقديرات للموارد برهنت في ما بعد على بعدها من الحقيقة.

تقدير كمية الموارد الإحفورية

إن المشكلة الرئيسة في تبديد الاختلافات حول موارد الوقود هي أن تقديرها أمر صعب جداً. ولا توجد في الحقيقة طريقة معروفة لوضع توقعات دقيقة وموثوقة حول كميات الموارد المستقبلية التي ستكون متاحة كوقود لتوليد الطاقة. ويصح هذا على النفط والغاز الطبيعي والفحم. ويتوقع أن يكون أيضاً صحيحاً في حالة أنواع الوقود الأحفوري الأخرى مثل السجيل والرمال القيرية.

---

2 «An Evaluation of the Adequacy and Reliability of Petroleum Information,» U. S. Dept. of Energy, Office of Consumer Affairs, January 1980.

وقد جرب الجيولوجيون مختلف التقنيات لتقدير هذه الموارد بناء على الأدلة المادية والمعلومات الإحصائية. إن التنقيب عن هذه الموارد الطبيعية بصورة شاملة عبر مساحات واسعة من الأرض بطرق توكيدية مثل الحفر أمر مكلف يصعب تحقيقه. لذا تم اللجوء إلى طرق مختلفة للمسح على مجال واسع للإبقاء على كلفة استحصال المعلومات ضمن المعقول. وتعتمد إحدى الطرق وهي الطريقة الحجمية (Volumetric Method) على الاستطلاع السطحي (وغالباً ما يحصل من الجو) ووضع الخرائط للبحث عن تشكيلات جيولوجية يعتقد أنها غنية بهذه الموارد. وإذا ما كان استطلاع سطح الأرض أمراً يعوّل عليه لمثل هذه التشخيصات كما تقول النظرية، فسيكون من السهولة بمكان تقدير أحجام الموارد تحت هذه المناطق. إلا أن معلومات الاستطلاع السطحي كما تبين أثبتت أنها على أي حال غير دقيقة في تشخيص المناطق الغنية بالموارد. وكان التشخيص السطحي في زمن مبكر من تاريخ صناعة النفط ناجحاً تماماً في تحديد مواقع جديدة للموارد في لويزيانا، لكنه برهن على ضآلة قيمته بعد بضع سنين في تكساس.

وأكثر الطرق استخداماً في تقدير الموارد على مجال واسع هو المنحنى اللوجستي. وتأخذ هذه الطريقة ببساطة النمط التاريخي للاستخراج عبر فترة معينة وتمدده ليأخذ الشكل التقليدي الذي يتناسب مع أي مورد محدود. وينتج من هذا منحنى على شكل حرف S للإنتاج المتراكم أو ما يقابله لمنحنى معدل الإنتاج ذي الشكل الجَرَسي[3]. ويمكن الاطلاع على منحنيات من هذا النوع في الشكلين 1.2 ـ أ و1.2 ـ ب اللذين يستخدمان بطريقة ملائمة في المناطق الواسعة لتقرير دورة الاستكشاف لمورد طبيعي قابل للاستنفاد عبر الزمن.

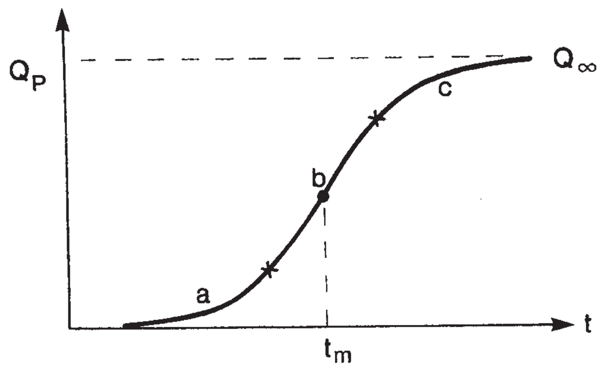
ويجري تفسير المنحنيات في ثلاث مناطق رئيسية: منطقة الزمن المبكر والمنطقة الوسطية والمنطقة اللاحقة (الشكل 1.2). فخلال المنطقة المبكرة (a) حيث يبدأ استغلال المورد تكون الزيادة في المقدار المستخرج كل عام جزءاً ثابتاً من المقدار المتراكَم المستخرج حتى ذلك التاريخ ـ أي إن النمو مركب. ويكون منحنى معدل الإنتاج ومنحنى الإنتاج المتراكم خلال هذه الفترة لوغارثميين عبر الزمن (وما لم يكن

3 لما كان الإنتاج المتراكم يتغير مع الزمن لذا يوصف بأنه دالة رياضية للزمن: Qp(t) وتوصف وتيرة الإنتاج كمشتق في الزمن: $P = dQp/dt$.

المورد الطبيعي ذا طبيعة محدودة، فإن النمو اللوغاريثمي يمكن أن يستمر إذا ما كان هناك طلب عليه).

أما المنطقة (*b*) من منحنى الإنتاج، فهي أولى بوادر محدودية المورد. فقد وصل المنحنى هنا أقصى ميل بالنسبة إلى الزمن الوسطي ويمر منحنى وتيرة التغير عند القمة (عند $t = tm$) ثم يبدأ بالهبوط. وهذه القمة في معدل الإنتاج تعطي إشارة مهمة بأن المورد سيصبح نادراً مع مرور الزمن.

أما منطقة الزمن اللاحق (*c*) فهي الفترة التي يصل فيها الإنتاج المتراكم (الشكل 1.2 ـ أ) الحد الأقصى للمورد (Q_∞) وهو الإنتاج الأقصى التراكمي أو الحد الأقصى الممكن استرداده من المورد. عندها يقترب منحنى الإنتاج التراكمي من حده المقارب(Q_∞)[4]. فيهبط منحنى معدل الإنتاج (الشكل 1.2 ـ ب) إلى الصفر «الإنتاج الصفري». لاحظ أيضاً أن المساحة الكلية ضمن منحنى معدل الإنتاج يجب أن تساوي الإنتاج التراكمي الأقصى أي (Q_∞).



الشكل 1.2.أ

الشكل 1.2

منحنيات لوجستية

(أ) الإنتاج التراكمي ضد الزمن

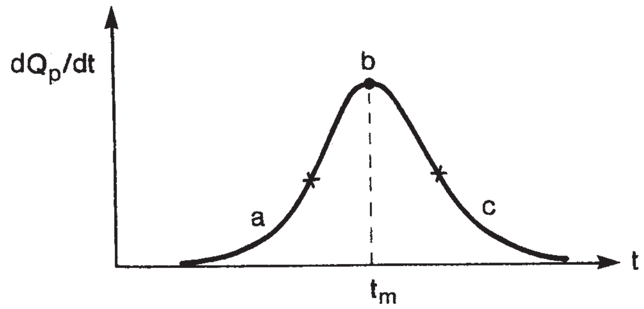
(ب) معدل الإنتاج ضد الزمن

a = منطقة الزمن المبكر

b = منطقة الزمن المتوسط

c = منطقة الزمن المتأخر

4 الحد المقارب (Asymptotic Limit) هو الخاصية الرياضية البحتة للمنحنى عندما يقترب من القيمة القصوى (Q∞) مع زيادة الزمن إلى اللانهاية. ويصل المنحنى للأغراض العملية حده الأقصى (المقارب) عندما يكون المقدار المتبقي قابلاً للإهمال (أقل من 0.1 في المئة مثلاً).



الشكل 1.2.ب

ويبين هذا الوصف للمنحنى اللوجستي ملاءمته لوصف التطور الزمني لاستغلال مورد محدود. والحقيقة أن هذا ليس إلا واحداً من الاستخدامات العديدة لهذا المنحنى التقليدي. فنمو السكان في البيولوجيا على سبيل المثال (من نوع البروتوزوا مثلاً) في بيئة محددة يتبع كما هو معلوم المنحنى على شكل حرف S. وفي ميادين النشاطات الإنسانية مثل اعتماد التكنولوجيات الجديدة عبر التاريخ (السفن البخارية مثلاً) نلاحظ منحنى الحرف S في نمط التطور عبر الزمن (وسيجري عرض ارتباط منحنى الموارد الأحفورية مع النشاط الاقتصادي لاحقاً في هذا الفصل) والآن لكي نفهم كيفية استخدام المنحنى اللوجستي لتقدير موارد النفط والغاز الطبيعي والفحم علينا أن نضيف منحنيين: أحدهما للاحتياطيات المكتشفة المتراكمة والآخر للاحتياطيات المثبتة المتبقية. علينا أولاً أن نوضح معنى هذه المصطلحات ونعرف علاقتها بمنحنيات الإنتاج أعلاه أما من حيث المعادلات.

الإنتاج المتراكم $= Q_p(t)$

الاحتياطي المكتشف المتراكم $= Q_d(t)$

الاحتياطي المتبقي المثبت (أو الاحتياطي ببساطة) $= Q_r(t) = Q_d(t) - Q_p(t)$

حيث يفترض ببساطة أن الاكتشافات المتراكمة تتجاوز الإنتاج بالشكل النسبي نفسه للمنحنى مقابل الزمن، وكالتالي:

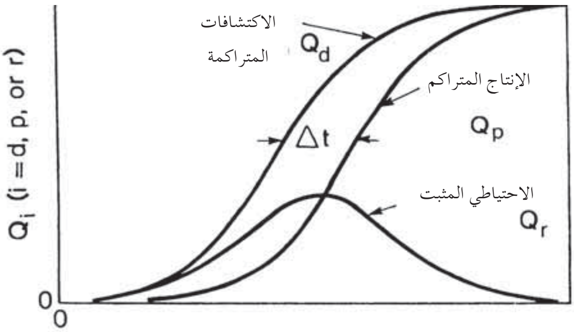
$$Q_d(t) = Q_p(t + \Delta t)$$

Δt = التأخر الزمني بين الاكتشاف والإنتاج. أيضاً

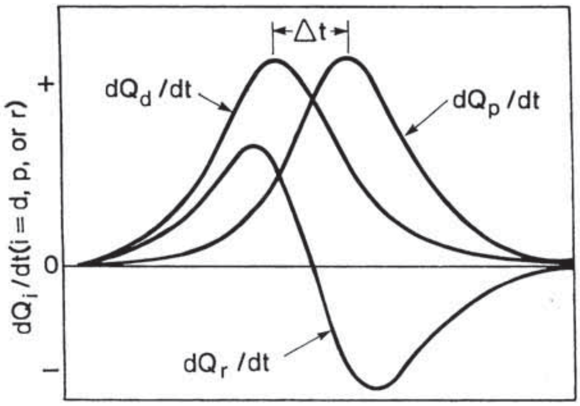
$$Q_\infty = Q_d(\infty)$$

$$= Q_p(\infty)$$

= الحد الأقصى للموارد القابلة للاستغلال أو الإنتاج التراكمي الأقصى



(أ)



(ب)

الشكل 2.2 التاريخ الزمني لاستغلال الموارد

(أ) الكميات المتراكمة مقابل الزمن

(ب) نسبة الكمية مقابل الزمن عن (1974) Penner & Icerman

يبين الشكل 2.2 استخدام كل من المنحنيات الثلاثة لوصف التاريخ الزمني لمورد معين. لاحظ أن المحور العمودي لمنحنى التراكم (والاحتياطي) سيعلّم بوحدات ملائمة للمورد المحدد: مليارات البراميل من النفط (BB*l*) ومليارات الأطنان المترية (Bmt) للفحم الحجري وتريليونات الأقدام المكعبة (TCF) للغاز الطبيعي. أما نسبة الاستخراج فيجب من الناحية الثانية أن يعبّر عنها كقياسات في وحدة الزمن: مليارات البراميل من النفط في السنة (BBl/yr) ومليارات الأطنان المترية من الفحم في السنة (Bmt/yr) وتريليونات الأقدام المكعبة من الغاز الطبيعي في السنة (TCF/yr). ويجب أن نلاحظ هنا حقيقة أن الاحتياطي $Q_r(t)$ يتغير مع الزمن. والانطباع الشعبي هو أن الاحتياطي في الأغلب مقدار ثابت من الموارد احتفظ به كاحتياطي لاستعمال لاحق

وحتى في استخدام النسبة للاحتياط /الإنتاج في صناعة النفط والغاز كالتالي:

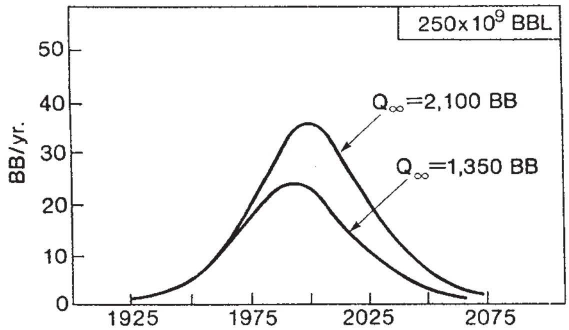
$$\frac{R}{P} = \frac{Q_r}{dQ_{p/d\text{t}}} \text{ [year]}$$

يعطي الانطباع لتوقع ثابت، في حين أن تفسيره الدقيق هو «إذا ما كان الاحتياطي في هذه السنة (R) يستنزف بنسبة إنتاج هذه السنة (P) فهذا الاحتياطي سيستنفد في R/P من السنين». ويمكن للاحتياطي بالطبع أن يتغير بسبب التغيرات الناجمة عن اكتشافات جديدة أو تغيرات في الإنتاج. ويمكن في الحقيقة لشكل المنحنى أن يؤكد الصفات البارزة لدورة الاستثمار.

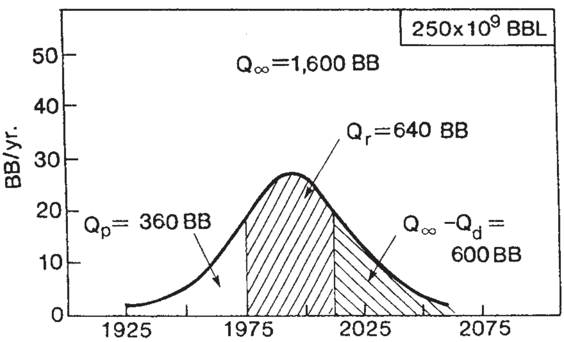
إن تقدير موارد الوقود الأحفوري قضية مثيرة للجدل لأن ما من أحد يعرف مقدار الحد الأقصى القابل للاستغلال من المورد (Q_∞) لأي منها. وسبب ذلك جزئياً على الأقل هو أننا عندما نعتبر أحد الموارد التقليدية قابلاً للاستخراج فنحن نعني أنه قابل للاستخراج اقتصادياً بالطرق التكنولوجية الحالية. وهناك بعض الموارد تعتبر غير تقليدية حيث لا يمكن استخراجها إما لأسباب اقتصادية أو لأسباب تقنية (أو لكليهما). ويمكن للاختراقات التكنولوجية أو لتغيرات الأسعار أن تحول الموارد غير التقليدية إلى تقليدية ونتيجة ذلك ترفع مستوى الحد الأقصى للاحتياطي القابل للاستثمار. وهناك الآن نوع من الشك، إذ إن بعض الموارد غير التقليدية قد لا تصبح قابلة للاستثمار أبداً سواء من الناحية الاقتصادية أو من الناحية التكنولوجية.

لذا نرى أن التقديرات يجب أن تكون على مستويين: **أولاً** لتقدير حجم المورد بكامله في الأرض (أي سواء أكان قابلاً للاستخراج اقتصادياً أم لا)؛ **وثانياً** عن الجزء القابل للاستخراج اقتصادياً. وعندما تضاف هذه التقديرات إلى الضغوطات الاجتماعية والاقتصادية المرافقة للوقود الأحفوري ستظهر الاختلافات في وجهات النظر. فالتقديرات الجديدة تُقبل أو تُفند تبعاً لكونها تدعم أو تعارض وجهة النظر الحالية لإحدى المجموعات ذات المصالح. ويمكن لوجهة النظر التفاؤلية أو التشاؤمية لمن يقوم بالتقدير أن تُحرّف التقديرات. فالتقديرات المختلفة التي تنشأ من هذه المناظرات ستمثل عادة بمنحنيات لوتائر الإنتاج حيث يمثل حجم المساحة تحت المنحنى التقديرات المختلفة (Q_∞).

ويبين الشكل (3.2.أ) كيف أن الاختلافات في تقديرات Q_∞ تظهر على منحنيات إنتاج المورد. وكانت هذه المنحنيات قد قُدِمت من قبل الجيولوجي الشهير م. كينغ هابرت (M. King Hubbert) وتمثل التفاوت في التقديرات القصوى لموارد النفط القابلة للاستخراج في العالم (Q_∞). ويُعزى إلى هابرت كونه الشخص الذي أثار المحدودية الوشيكة لمواردنا من النفط والغاز الطبيعي. وكان تقديره للنفط في العالم (وقد وضع ذلك التقدير عام 1969) يتراوح بين 1350 مليار برميل و2100 مليار برميل. وتقول دراسة أحدث أعدها ويلسون (Wilson) أن مقدار Q_∞ = 1600 مليار برميل وهو يتجاوز نقطة الوسط بين القيمتين اللتين يعطيهما هابرت بقليل.



(أ)



(ب)

الشكل 3.2 نفط العالم – الاستهلاك المتوقع

Q_∞ = بين 1.350 و2100 مليار برميل (تقديرات)

Q_∞ = 1.600 مليار برميل (تقديرات)

مقتبسة من هابرت (1973) ومن ويلسون (1977).

إن تأثير هذه التقديرات المختلفة لمجموع الاحتياطي في وتيرة الإنتاج كما تتوقعه المنحنيات اللوجستية ذات أهمية. وأول ميزة هي أن الوقت المقارب للاستنفاد لا يتناسب مع الحجم الأقصى للمورد. فالمنحنيان اللذان وضعهما هابرت لنفط العالم مثلاً يعكسان اختلافاً قدره خمسين في المئة في كمية المورد المقدرة، لكن الوقت اللازم للاستنفاد لايتواءم مع هذه النسبة. وتتوقع المنحنيات اللوجستية أن أي زيادة في Q_∞ المقدرة يقابلها زيادة في مستوى الإنتاج كما في الزمن. وسبب الزيادة المتوقعة في الإنتاج كما في زيادة الزمن هو تأثير الشح المتوقع أو الوفرة في الطلب والسعر لذلك المورد (انظر الفصل 4).

ومن الممكن أخيراً أن تقسم المساحة الكلية تحت منحنى الإنتاج (Q_∞) إلى كميات تراكمية مختلفة. فالشكل 3.2.ب مثلاً يعطي وتيرة الإنتاج العالمي للنفط لعام 1975 لذا فإن خطاً عمودياً قد رسم تحت المنحنى عند تلك السنة. والمساحة تحت هذا المنحنى إلى اليسار من خط تلك السنة تمثل الإنتاج التراكمي (Q_p) لغاية تلك السنة. وتمثل المساحة المخططة والمعلّمة Q_r الاحتياطي المتراكم بحسب تقديرات عام 1975. إضافة إلى ذلك، فإن مجموع المساحتين Q_p و Q_r يجب أن يمثل الاكتشافات المتراكمة Q_d حتى تلك السنة وذلك لأن:

$$Q_d = Q_p + Q_r$$

وتمثل المنطقة الأخيرة الموارد الباقية والتي لم تُكتشف لحينه. وإذا ما بدأنا منطقياً من المساحة التي تمثل الاكتشافات المتراكمة Q_d فإن المساحة الباقية ضمن تحت الإنتاج إلى اليمين من Q_p وQ_r يجب أن تكون (Q_∞- Q_d) وهي كمية الموارد الباقية وغير المكتشفة. كما إن جزءاً من هذه الموارد الباقية هي «احتياطي مخمن» ومؤكد ما يعني أنها آتية من امتدادات للحقول الحالية. أما ما تبقى فهي على أي حال ليست إلا افتراضات ذكية حول الجيولوجيا خارج الحقول المعروفة. وهي تمثل نحو ثلث كمية الاحتياطيات النفطية غير المكتشفة في الولايات المتحدة ونحو ثلثي احتياطيات الغاز الطبيعي غير المكتشفة. وهذه الكمية غير المؤكدة هي موضع جدل في تقييمها من حيث حجم المتبقي منها والنسبة التي يمكن استخراجها اقتصادياً.

تقدير حجم موارد الوقود الأحفوري في الولايات المتحدة والعالم

موارد الولايات المتحدة

إن التقديرات الحالية لموارد النفط الداخلية في الولايات المتحدة تظهر في الشكل 4.2. وهذا المنحنى اللوجستي هو تحديث لتقديرات هابرت لعام 1980 ويتفق مع التقديرات الحديثة الأخرى. لاحظ أن نسبة *R/ P* للنفط في الولايات المتحدة ليست 10 سنوات بالضبط وأن الموارد الباقية (التقليدية) غير المكتشفة (Q_∞-Q_d) تقدر في حدود 23 – 40 مليار برميل.

وهناك حالياً تقديرات مقبولة بصورة واسعة للموارد النفطية في الولايات المتحدة رغم أن عقوداً من الجدل سبقتها. وأول تقديرات لموارد الوقود الأحفوري كانت نتيجة محاولة لإدارة المسح الجيولوجي للولايات المتحدة (USGS) من عام 1908 لغاية 1918 باستخدام ما قد يدعى الآن طرقاً بدائية. وكانت الغاية من هذه التقديرات هي لمساعدة صناعة النفط الناشئة آنذاك لكن رد فعل الصناعة لاستنتاجات USGS كان عدائياً. فقد اعتبرت التقديرات منخفضة جداً وأثارت ما عرف في حينه «بِبُعبع»



الشكل 4.2

وتيرة إنتاج النفط في الولايات المتحدة مقابل السنة

170 مليار برميل = Q_∞

22 مليار برميل = R = Qr

2.4 مليار برميل /السنة = P = dQp/dt

41 مليار برميل = Q∞ - Qd

المصدر: (US EIA (1994، وإدارة المسح الجيولوجي في الولايات المتحدة (US Geological Survey (1994) مأخوذة بتصرف من EEE (1977) .

الاستنزاف. ويبدو بالعودة إلى تلك الحقبة أن التقديرات جرى تناولها بما سننعته بوجهة النظر التحديدية[5] بينما برزت الانتقادات من أصحاب المنظور التوسعي. واعتقد الجيولوجيون الحفاظيون من USGS أن النفط كان في الأساس ينضب وخافوا من أن يُهدر. وأرادوا أن تقوم الحكومة بتنظيم وتيرة إنتاج الشركات. أما الشركات التوسعية فلم ترد من الناحية الأخرى أي تحديدات حكومية على الكمية التي تستخرجها آنذاك.

وسرعان ما برهن التاريخ على أن الجيولوجيين كانوا مخطئين: فتقديراتهم كانت قد جرت قبيل اكتشاف ترسبات واسعة جديدة من النفط في الجنوب الغربي للولايات المتحدة الأميركية فقط لذا فإنها حدثت ضمن فترة كانت الخبرة في دورة الاكتشاف فيها محدودة.

المنظورات وطبيعة الجدل تغيرت بصورة جذرية مع الاكتشافات الكبيرة في تكساس وأوكلاهوما. وحلّت التخمة موضع الندرة كمركز للاهتمام وبخاصة بالنسبة إلى شركات النفط الكبرى[6] التي كان انهيار الأسعار والأرباح على المدى البعيد هو الذي يقلقها. وقامت الشركات نفسها في نهاية العشرينيات وبسبب التقديرات الكبيرة للاحتياطي بتغيير موقفها وطالبت بضوابط للإنتاج إما طوعية أو من خلال قوانين لتغيير وموازنة الأسواق لمصلحتها. والحقيقة أن شركات النفط واجهت مأزقاً فقد أرادت تحديد الإنتاج لكنها كرهت أن تنظمها الحكومة.

وكانت USGS في الوقت ذاته لا تزال تنشر تقديرات تشاؤمية لاحتياطيات النفط المتبقية وكان ما يحركهم الآن اهتمام حفاظي حول ـ الاستنزاف على المدى البعيد. وحاولت شركات النفط خلال العشرينيات المحافظة على مصالحها من خلال تشكيل لجانها الخاصة لجمع المعلومات وتقدير الاحتياطي.

بعد الحرب العالمية الثانية ارتفع الاحتياطي من دون جدل لغاية عام 1967

---

5 هذا مرادف تاريخياً للمنظور الحفاظي أو المحافظة على الموارد (انظر: Wildavsky and Tennenbaum, 1981).

6 يقدم ويلدافسكي وتينينباوم (Wildavsky and Tennenbaum, 1981) تحليلاً ممتعاً عن المنظور المختلف كلياً عن الأسعار والأرباح للشركات المستقلة الصغيرة خلال فترة العشرينيات والثلاثينيات.

لـكـن جـهـود الـحـفـر الاسـتـكـشـافـي هـبـطـت بـعـد عـام 1957. ويـدّعـي بـعـض الـنـقـاد (Commoner, 1979) أن هذا الهبوط في جهد الحفر كانت له علاقة بالكمية المتزايدة من النفط المستورد. وقد قلّص هذا المصدر الرخيص الحافز للحفر في الولايات المتحدة ولكون الحفر جزءاً من عملية الاستكشاف، تباطأت وتيرة الإضافة إلى الاحـتـيـاطـي. لـذا تـبـعـاً لـلـنـقـاد كـانـت تقديرات الاحتياطي (وحتى للكمية القابلة للاستخراج) منخفضة جداً.

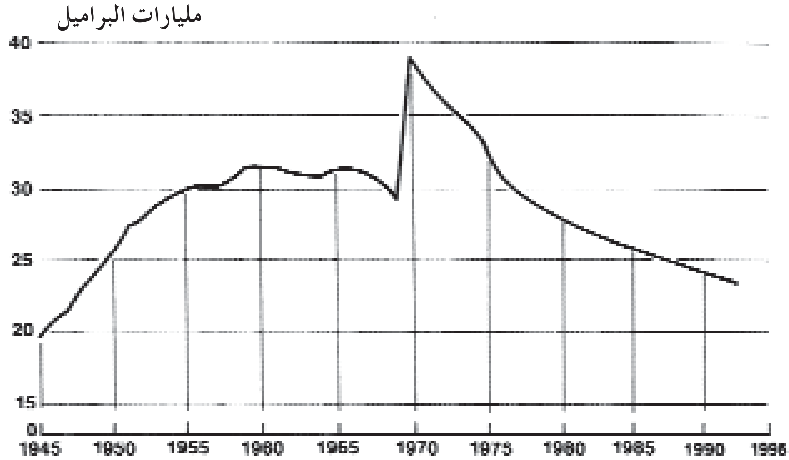
كانت هناك أسئلة أيضاً خلال هذه الفترة عن وتيرة اكتشاف النفط وهي الوتيرة التي يكتشف فيها النفط في وحدة الحفر الاستكشافي. وكانت الأدلة تتزايد خلال فترة ما بعد الحرب على أن العثور على النفط أصبح أكثر صعوبة في أحواض الولايات المتحدة المشغولة بكثافة. وعلى أي حال فحتى إحصائيات هذه الاكتشافات التي يستخدمها الجيولوجيون ليقدروا استقرائياً وتيرة الاكتشاف، لم تكن بمنأى عن التأويل.

فقد قام أ. د. زاب (A. D. Zapp) وهو جيولوجي يعمل في USGS عام 1963 بنشر تقدير لموارد النفط الكلية في الولايات المتحدة بلغ $Q_{\infty} = 590$ مليار برميل. لكن م. ك. هابرت كان في الوقت ذاته قد عرض تقديراً أقل بلغ 165 مليار برميل ونشره عام 1969. ومهما كانت الأسس الداعمة لتفاؤل زاب إلا أن تقديراته دعمتها الصناعة (Blair, 1978). إن الحوافز الكامنة لتحمس الصناعة لتقديرات الموارد العالية مثلتها الرغبة في وضع (كوتا) أو حصة نسبية لكميات النفط المستوردة (Wildavsky and Tennenbaum, 1981). ويقول النقاد إن هذه الكوتا تساعد في إيقاف الضغط نحو أسعار أقل للنفط المحلي الذي قد تسببه الإمدادات المتزايدة من النفط المستورد الرخيص. وساندت التوقعات حول موارد نفطية متوافرة محلياً، الفكرة القائلة إن بإمكان الولايات المتحدة تحديد استيراد النفط. لكن نظام كوتا الاستيراد جرى نقضه بعد مدة قصيرة على أي حال نتيجة ضغوط المستهلكين وزادت الاستيرادات لتلبية طلبات متنامية لم يتمكن الإنتاج المحلي من تجهيزها.

ولم يكن تفاؤل زاب قد تراجع نتيجة التقديرات التي تلت والتي مالت إلى أرقام هابرت. وكان افتراض وتيرة معينة لاكتشاف النفط هوأساس الموضوع. وكان زاب

قد افترض وتيرة اكتشاف ثابتة مقترحاً أن اكتشافات النفط ستستمر على منوال السنوات السابقة نفسه. أما هابرت فقد افترض مع ذلك أن وتيرة الاكتشاف سوف تنخفض وهو ما حدث فعلاً.

وقد تقبلت كل من الحكومة والشركات في السنين الأخيرة وجهة نظر هابرت القائلة إن وتيرة الإنتاج لموارد النفط المحلية وصل حده الأعلى. وما لم تحدث تغيرات ملحوظة في التكنولوجيا أو في تقديرات الموارد الباقية فإن وتائر الإنتاج ستستمر في الانخفاض.



الشكل 5.2

النفط الأميركي – الاحتياطي المثبت مقابل السنة.

المصدر: معهد البترول الأميركي (1977)، و (1988 - 1987) oil & gas Journal و(1993) Us. EIA.

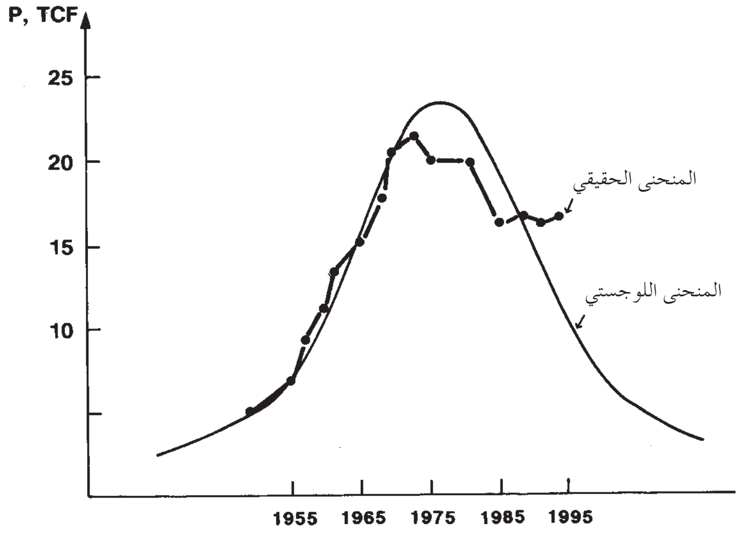
هذا الاستنتاج يتعزز إذا فحصنا تاريخ زمن (التراكم) الاحتياطي لنفط الولايات المتحدة* كما يبينه الشكل رقم 5.2. ونرى هنا منحنى يبدأ عام 1945 ويستمر في الارتفاع ليصل حداً أعلى أوائل ستينيات القرن الماضي. أما الارتفاع الفجائي عام 1970 فيعود إلى إدخال الاكتشافات في ألاسكا في قاعدة المعلومات والتي من دونها

* كان احتياطي الولايات المتحدة المثبت من الغاز الطبيعي في نهاية عام 2008 قد بلغ237.7 TCF ، بينما كانت نسبة R/P تبلغ 11.6 (B. P. Statistical Review of World Energy, 2009) وهذا يمثل تحسناً على الأرقام السابقة. الهوامش المشار إليها بـ(*) هي من وضع المترجم.

كان المنحنى يهبط بصورة أكثر سلاسة إذا ما شمل الولايات الثمان والأربعين السفلى فقط. وكانت الاحتياطيات وصلت ذروتها قبل سرعة الإنتاج بصورة عامة وهذا يتماشى مع نمط المنحنى اللوجستي.

موارد الغاز الطبيعي في الولايات المتحدة

يقدم الغاز الطبيعي (الشكل 6.2) صورة مماثلة في الوقت المناسب. ونرى هنا أيضاً أن وتيرة الإنتاج قد تعدت نقطة القمة وهي حقيقة تؤيدها القمة التي سبقتها في كمية الاحتياطي (الشكل 7.2). ويدعم نمط الاكتشافات السنوية، مطروحاً من الإنتاج هذا المنظور أيضاً (منحنى الأعمدة في الشكل 7.2). لاحظ أيضاً في هذه النتائج القفزة التي حدثت عام 1970 والتي تعود إلى الاكتشافات المتزامنة للغاز الطبيعي مع اكتشافات النفط في ألاسكا.



الشكل 6.2:

معدل الإنتاج للغاز الطبيعي الأمريكي مقابل السنة

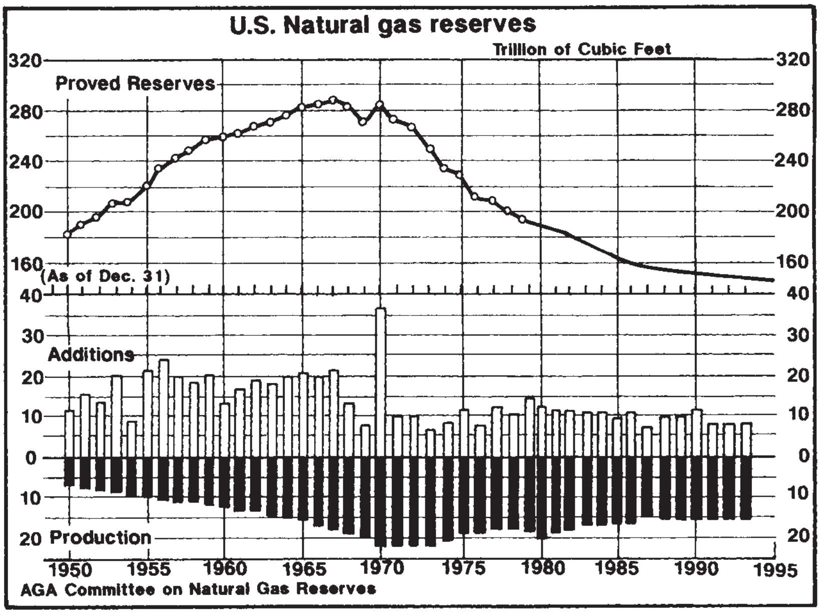
Q∞ = 1700 TCF

R = Qr = 135 - 162

TCF, P = dQp/dt = 17.4 TCF/yr

Q∞ - Qd = 580 TCF

المصادر: CONOCO (1989)، وUS EIA (1993) وUSGS (1995).



الشكل 7.2

الغاز الطبيعي الأمريكي – الاحتياطي مقابل السنة (فوق)

والمضافات بالاكتشاف والإنتاج السنوي (تحت)

المصادر: American Gas Association (1980) وOil & Gas Journal (1982 - 1988) و(1989) CONOCO و US EIA (1993).

إن نسبة R/P (الاحتياطي/ الإنتاج) للولايات المتحدة (بما فيها ألاسكا) للغاز الطبيعي تبلغ الآن نحو تسع سنين، وبلغت الموارد الباقية غير المكتشفة (التقليدية) (Q_∞-Q_d) بحسب التقديرات نحو TCF 580 وذلك عام 1994. هذه التقديرات العامة لم تكن مثيرة للجدل نسبياً قبل الفترة التي أدت إلى اقرار قانون الغاز الطبيعي عام 1978 عندما عرضت على الجمهور تقديرات متباينة جداً لموارد الغاز[7].

7 أعطي ممثلو AGA معلومات متحفظة وتقديرات للموارد المتبقية تقارب هذه المثبتة هنا (إعلانات ظهرت في Energy Users News, 17 July and 23 October, New York: Fairchild Publications, 1978,)

ومع ذلك فإن بعض المجلات التجارية، على سبيل المثال، (Business Communications, BCR Enterprises, Inc., Hindsdale, IL, Summer 1977).

قدمت تقديرات للاحتياطي كانت أعلى بضعة مرات عن الأرقم المدرجة هنا وتكلمت عن «احتياطي إضافي» في الطَفَل من العصر الديفوني في الميثان المضغوط جيولوجياً [وهو غازميثان مذاب في ماء مالح ساخن تحت ضغوط عالية وأعماق تتجاوز عشرة آلاف قدم] (المترجم) التي تزيد بدرجة مرتبية على تقديرات Q∞-Qd المعطاة أعلاه. =

وكان أحد مصادر الإرباك حملة العلاقات العامة القوية التي أدارتها الصناعة والتي هدفت إلى إقرار القانون وإلى تحرير أسعار الغاز. وادعت الصناعة مثلاً أن «تحرير القيود سيجلب بالتأكيد مصادر إضافية مؤثرة (*Energy Users News*, Fairchild Publications, New York, October 1978). وأعطت بعض هذه التصريحات العلنية انطباعاً مبهماً عن موارد ضخمة من دون نشر معلومات يمكن مناقشتها. وقُدمت تصريحات أخرى في الوقت ذاته تقديرات أخرى كانت أكبر من غيرها في تلك الفترة. وما فشلت هذه المصادر الأخيرة في ملاحظته (أكان ذلك بالإهمال أو عن سابق قصد) هو أن تقديراتها لم تبنَ على الأسس نفسها كالتقديرات التقليدية، أي إنها لم تتبع التعريف المتفق عليه للموارد القابلة للاستخراج اقتصادياً، بأنها ذلك الجزء القابل للاستخراج الاقتصادي (من الموجود في موقعه) بواسطة التكنولوجيا الحالية. وأشارت مصادر الصناعة إلى الموارد الغازية في الطغل الصفحي الديفوني والتشكيلات المضغوطة جيولوجياً على أنها غير قابلة للاستخراج اقتصادياً بواسطة التكنولوجيا الحالية. والواقع أن مثل مصادر الغاز غير التقليدية هذه (انظر الفصلين 5 و10) رغم المعرفة بوجودها لم يجرِ استقصاؤها بصورة كاملة لذا فإن تقدير حجمها ليس إلا افتراضات غير مثبتة.

كان هناك أيضاً خلال فترة تشريع إزالة القيود سلسلة من التذبذات المربكة في تجهيزات الغاز. فقد حدثت شحة في أجزاء عدة من البلد عام 1976 وقد قُلص التجهيز إلى عدد من المستخدمين الصناعيين في الغرب الأوسط مما نجم عنه تسريح العمال. وكان هناك تجاوز في التجهيز عام 1979 سمي (بالفقاعة) في حينه. ورغم أن المتحزبين لإزالة القيود أنفسهم ادعوا أن القناعة برهنت على وجود احتياطيات واسعة جديدة من الغاز الطبيعي، إلا أن ما تبين منذ ذلك الوقت هو أن الزيادة لم تكن إلا تذبذباً قصير المدى بسبب تأثير إزالة القيود السعرية في السوق.

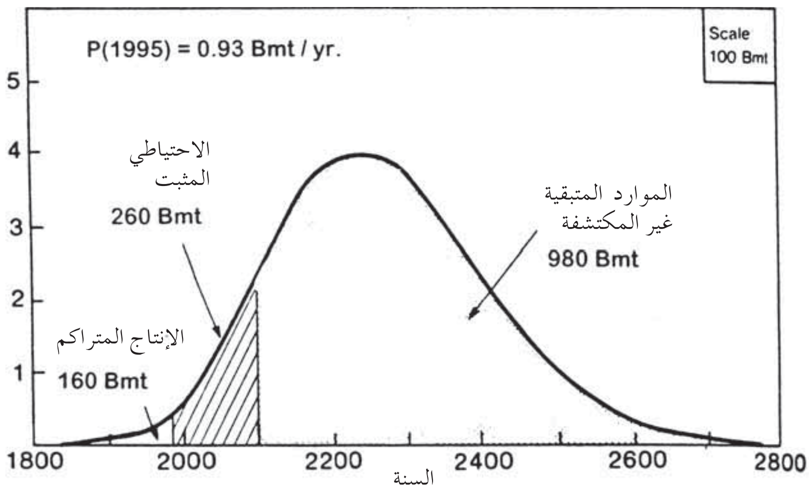
لقد جرى في السنين القليلة الماضية التحول إلى الغاز في العديد من الاستخدامات الجديدة، الذي حل مثلاً (ولو إلى حدود معينة) بدل النفط كوقود لوسائط النقل، كما

= وقد ذكرت أيضاً مجموعة من شركات إنتاج الغاز (Pitts. Energy Group, Dallas, Texas) في إعلان ظهر في Energy Users News (1978) «مصادر ماء ملحية عميقة تحت ضغط عالٍ» على ساحل الخليج في تكساس والتي كانت تزيد بدرجة مرتبية على تقديرات Q∞-Qd.

حل (إلى مدى أبعد بكثير) محل الفحم في توليد الكهرباء. فالغاز الطبيعي أقل تلويثاً من الفحم أو حتى من النفط. إذ إنه فعلياً لا يحوي أي كبريت، لذا لا ينفث أي كميات تستحق الذكر من ملوثات الكبريت عند حرقه. ومع شعورهم بوجود أسواق تتوسع بدرجة كبيرة قام منتجو الغاز الطبيعي بتشجيع هؤلاء المستخدمين الجدد، كما قاموا بنشر تقديرات جديدة «لقاعدة الموارد» أعلى بكثير من التقديرات السابقة وأعلى بدرجة ملحوظة عن تقديرات USGS (Enron, 1993 and USGS, 1995).

موارد الفحم في الولايات المتحدة

إن الصورة التي تقدم عن موارد الفحم في الولايات المتحدة تختلف عن صورة موارد النفط والغاز بصورة مدهشة (الشكل 8.2). وفي حين أن الشكل العام لهذا المنحنى اللوجستي يشابه منحنى النفط والغاز الطبيعي إلا أن المقاييس أكبر في الحجم والزمن.



الشكل 8.2
الفحم الأميركي – دورة الاستهلاك المعتمدة من قبل هابرت (1973).
المصدر: ويلسون (1980) و(1995) US EIA.

وكانت أعلى كمية للإنتاج (نحو 4 Bmt/ السنة) مثلاً تبلغ تقريباً أربعة أضعاف كمية الاستهلاك الحالي (عام 1995 نحو 0.9 Bmt في السنة)*. ولا يتوقع حدوث قمة الإنتاج حتى القرن الثالث والعشرين.

* بلغ إنتاج الولايات المتحدة 0.597 Bmt في سنة 2008: (B. P. Statisticals Review of World Energy, 2009).

ولا يزال المنحنى اللوجستي الحالي مشابهاً منحنى المنطقة المبكرة حيث يكون النمو الزمني لوغاريثمياً ـ وهي حالة ستستمر إلى فترة طويلة في القرن التالي. وخلاصة الأمر أن هذا المورد كبير مقارنة بالطلب الحالي على النفط والغاز، بحيث لا توجد أي هموم أو مواضيع جدل أخرى حول شُحّته كما توجد حول النفط والغاز الطبيعي. لاحظ بالمناسبة أن هذا المنحنى اللوجستي مرسوم بافتراض إن نسبة استخراج 50 في المئة هي نسبة اقتصادية. وبعبارة أخرى أن كمية المورد وهو في موقعه تبلغ ضعف الكمية التي يفترض أنها قابلة للاستخراج. كما إن مساحة الاحتياطيات المثبتة ضمن منحنى إنتاج الفحم (الشكل 8.2) لا تمثل سوى 19 في المئة من مساحته ما يشير إلى أن نسبة 81 في المئة من هذا المصدر الهائل القابلة للاستخراج اقتصادياً باستخدام التكنولوجيا الحالية، ما زالت تنتظر الاستكشاف. علماً أن نسبة *R/P* الحالية تبلغ أكثر من 200 سنة.

ورغم هذه الوفرة الهائلة للفحم فهو لا يلبي حالياً سوى أقل من خُمس احتياجات الطاقة في الولايات المتحدة سنوياً ـ ولا يتوقع ازدياد استخدام الفحم في العقود القادمة بسبب التحديدات والقيود التي يضعها على كاهل البيئة والصحة العامة والنقل والتطور التكنولوجي مثلما سنراه في الفصول القادمة.

موارد الوقود الأحفوري في العالم

يبين الشكل 3.2 منحنى لوجستي لإنتاج النفط المتوقع في العالم. ونرى أن قمة إنتاج النفط يتوقع أن تحدث في العقد الأخير من هذا القرن رغم أن التوقع الدقيق سيعتمد على تقدير الكمية العظمى القابلة للاستخراج Q_∞.

ويمكن أن نلخص التاريخ القريب لإنتاج الوقود الأحفوري في العالم والتوقعات حول المواد على الوجه الآتي:

النفط في العالم

الإنتاج (1994):

$$P = \frac{dQp}{dt} \approx 22 \text{ BB}l/\text{yr}$$

الاحتياطي (1994):

$$R = Q_r \approx 1,103 \text{ BB}l$$

النسبة:

$$\frac{R}{P} = \frac{1,103}{22} \approx 50 \text{ years}$$

الحد الأقصى للمورد الممكن استخراجه (1994):

$$Q_\infty \approx 2,273 \text{ BB}l$$

الموارد المتبقية غير المكتشفة 1993:

$$Q_\infty - Q_d \approx 471 \text{ BB}l$$

الغاز الطبيعي في العالم

الإنتاج (1995):

$$P = \frac{dQ_p}{dt} \approx 73 \text{ TCF/yr}$$

الاحتياطي (1995):

$$R = Q_r \approx 4980 \text{ TCE}$$

النسبة:

$$R/P = \frac{4,980}{73} \approx 68 \text{ years}$$

الحد الأقصى للموارد القابلة للاستخراج (1979):

$Q_\infty \approx 11,561$ TCF[8]

الموارد المتبقية غير المكتشفة (1994):

$$Q_\infty - Q_d \approx 4,687 \text{ TCF}$$

الفحم في العالم

الإنتاج (1995):

$$P = \frac{dQ_p}{dt} \approx 3.53 \text{ Bmt /yr}$$

الاحتياطي (1995):

$$R = Q_r \approx 1,038 \text{ Bmt}$$

النسبة:

$$R/P = \frac{1,038}{3.53} \approx 294 \text{ years}$$

الحد الأقصى للموارد الممكن استخراجها (بافتراض 50 في المئة استخراج: 1980)

$$Q_\infty \approx 5,380 \text{ Bmt}$$

الموارد المتبقية غير المكتشفة (1995):

$$Q_\infty - Q_d \approx 5,400 \text{ Bmt}$$

إن المنظور بعيد المدى للوقود الأحفوري على المستوى العالمي يشابه الموقف في الولايات المتحدة نوعاً ما. فالفحم مرة ثانية يمثل مورداً هائل الحجم لكنه يعاني بطئاً في التطوير بسبب القيود التكنولوجية والبيئية. فمصادر الفحم والغاز الطبيعي عالمياً كما في الولايات المتحدة تعتريها محددات كثيرة آنية.

وأكثر المقارنات للموارد الوطنية تشويقاً هي للنفط، ذلك لأن أثر السوق العالمية على هذه السلعة شامل بدرجة كبيرة. فرؤيتنا لا تقتصر على توقع وصول الإنتاج العالمي ذروته بعد عقدين من وصول الولايات المتحدة إليه، بل إن النسبة الحالية للاحتياطي/ الإنتاج (*R/P*) هي أربعة أمثال قرينتها في الولايات المتحدة. ومن غير المدهش أن نجد معظم هذا الاختلاف في دول منظمة أوبك. وأكثر الأمثلة وضوحاً لحيازة كميات كبيرة من النفط نجدها في الشرق الأوسط، حيث إن السعودية هي أكبر مالك وأكبر منتج للنفط. وتمتلك المنطقة ما يقارب نصف موارد النفط العالمية القابلة للاستخراج مع احتياطيات ثابتة بحدود 500 مليار برميل ونسبة *R/P* تبلغ أكثر من 50 عاماً، بمقارنة صارخة مع الولايات المتحدة. لذا فمن البدهي أن تكون هذه الأقطار في موقع يتيح لها تصدير النفط إلى دول مثل الولايات المتحدة في العقود الماضية ويتوقع أن تستمر بالحفاظ على هذا الموقع.

وبالرغم من ذلك يبدو أن مصادر النفط والغاز الطبيعي التقليدية على مستوى العالم في طريقها إلى الاستنفاد. والمقاييس الزمنية لذروة الإنتاج المتوقعة في هذين النوعين من الموارد الأحفورية هي مسألة عقود، ويتوقع بعد ذلك أن تتقلص وتيرة الإنتاج العالمي ببطء كما حدث في الولايات المتحدة. وإذا ما برهنت هذه التوقعات صحتها فما الذي نتوقع حدوثه؟

أول شيء هو ارتفاع سعر أنواع الوقود هذه. ليس من الواضح كم ستكون حدة الارتفاع، إنما هل نستطيع القول إن هذا الارتفاع السعري سيضيف إلى الاحتياطي «التقليدي» الذي تقرره القدرة على إنتاج المادة اقتصادياً؟ وسيوفّر ذلك حافزاً على الصناعة أيضاً لتوفير طرق تكنولوجية أكثر كفاءة تتطلب طاقة أقل، أو اللجوء إلى مصادر بديلة، لكن ما هي هذه المصادر؟ وما هي كلفتها؟ وهل ستحدث آثاراً اقتصادية شديدة مثل تلك التي حدثت في السبعينيات (أو ربما أكثر سوءاً) قبل أن نجد البديل الاقتصادي؟ وهل هناك ضمن خططنا السياسية ما نستطيع عمله الآن لتقليل وقع هذه الآثار؟ وتكتسب هذه المشكلة بعداً طويل الأمد يتجاوز جيلنا، إذ إن المشاكل

تكمن في المستقبل في حين أننا نبحث عن حلول لها اليوم. والحقيقة أن هذا بُعد سنواجهه كثيراً قدر تعلق الأمر بموارد الطاقة وتكنولوجيتها: فنحن نؤثر في الإمكانات المتوافرة للأجيال القادمة عندما نستهلك موارد قابلة للنضوب. وفيما نفكر بالخيارات المتاحة لنا اليوم علينا أيضاً أن نسأل عن نوع العالم الذي سنتركه لمن يخلفنا.

الموارد المتجددة

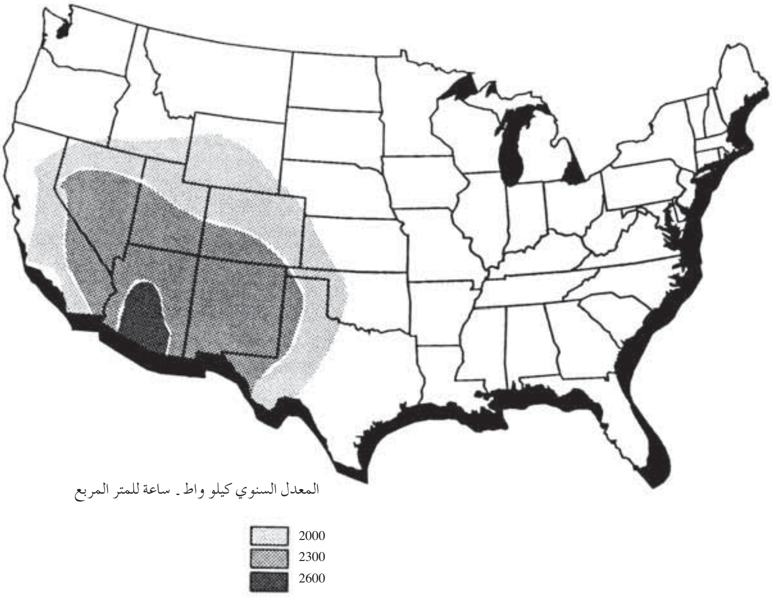
موارد الولايات المتحدة المتجددة

بخلاف موارد الوقود الأحفوري وهي في الأساس مخفية في آبار أو مناجم تحت الأرض، فإن الموارد المستجدة يمكن تحديدها وتقديرها بوضوح. الأكثر من ذلك، نعرف أيضاً متى وأين يتوقع أن تُطور عندما تصبح تقنياً واقتصادياً، عملية. أحد هذه الموارد المتجددة، القوة الكهرومائية وهي تستخدم فعلاً وتقدم مساهمة مهمة في توليد الطاقة الكهربائية. وسيشمل هذا المورد في مناقشة مصادر الطاقة التقليدية في الفصل التالي.

وأكبر مورد متجدد طرأ هو الطاقة الشمسية. فالأرض تستلم يومياً من طاقة الشمس ما يربو على 15000 مرة من الطاقة التي ينتجها الإنسان من الأنواع كافة. ومع ذلك، فإن جزءاً صغيراً جداً فقط منها يحول لإنتاج طاقة مفيدة. إضافة إلى ذلك، فإن التغيرات الموسمية لكمية ضوء الشمس تجعل من الصعب استخدام المصادر الشمسية بصورة فاعلة في كثير من مناطق القطر (يقصد بذلك الولايات المتحدة). وتتمتع منطقة جنوب غرب الولايات المتحدة كما يبين الشكل 9.2 بأعلى إمكانية لاستغلال الطاقة الشمسية. ومعنى هذا أن معدل مجموع الطاقة الشمسية التي تصيب المتر المربع الواحد خلال السنة أعلى في أريزونا وأجزاء من الولايات المجاورة من أي بقعة أخرى في الولايات المتحدة.

أما موارد طاقة الرياح فتوزيعها لا يعتمد على قوة الرياح في منطقة محددة وحسب، بل على تواصلها واستمراريتها. ويبين الشكل 10.2 التوزيع المناطقي لمعدل سرعة الرياح في مديات تسمح باستغلال مهم لقوة الرياح. وأكثر معدل لسرعة الرياح موجود في المناطق الجبلية وبعض المناطق الساحلية. وأكثر المواقع ملاءمة لإنشاء مولدات تعتمد الرياح ربما تكون السهول المفتوحة حيث لا يوجد إلا القليل من العوائق وحيث يمكن أيضاً استغلال الأرض للزراعة. وهكذا فإن القسم العلوي من

الغرب الأوسط (أي داكوتا وأيوا وكنساس ونيبراسكا) هي المنطقة التي جرى اختيارها لإقامة مزارع الهواء (Wind Farms) الواسعة في المستقبل.

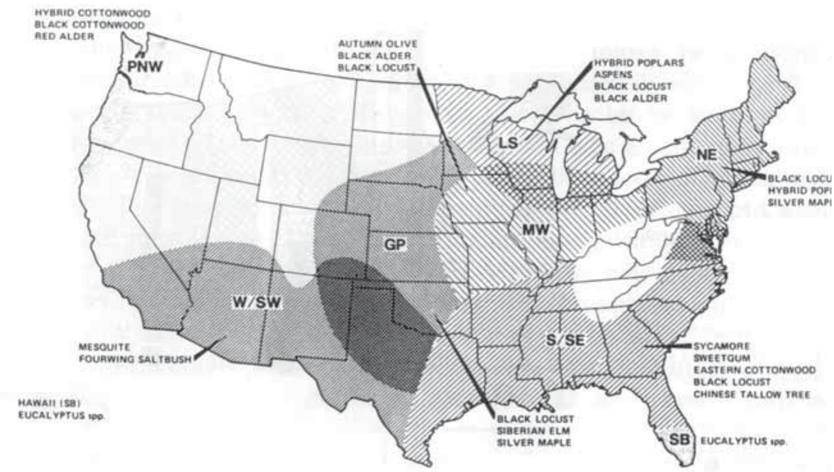


الشكل 9.2: مصادر الطاقة الشمسية في الولايات المتحدة
المصدر: معهد أبحاث القدرة الكهربائية، بالو ألتو، كاليفورنيا.

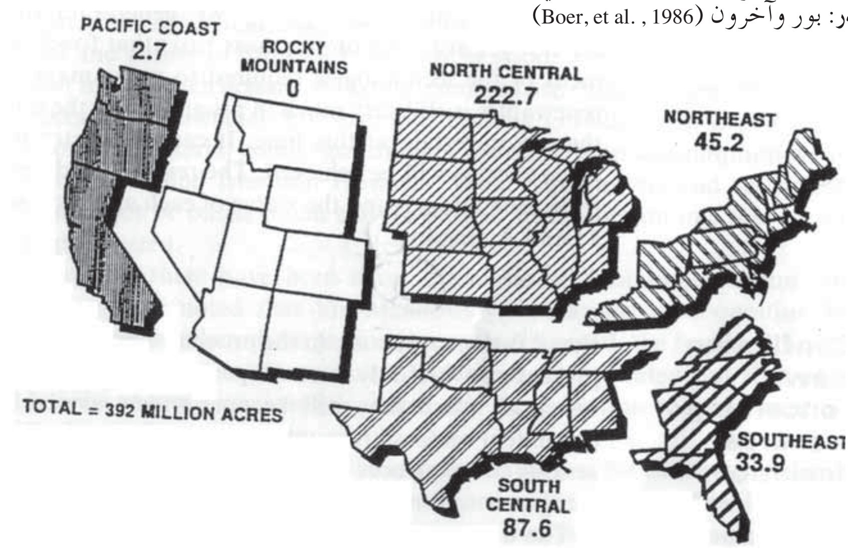


الشكل 10.2: مواقع طاقة الريح في الولايات المتحدة
المصدر: معهد أبحاث القدرة الكهربائية، بالو ألتو، كاليفورنيا.

تُنتَج موارد الكتلة الحيوية في المناطق البرية، حيث يمكن زراعة المحاصيل أو الأشجار بسهولة للاستخدام في صنع الوقود، أو للحرق مباشرة لقيمتها الحرارية. لكن استخدام هذه الأرض ينبغي ألا ينافس استخدامها للمحاصيل الغذائية أو في زراعة الأشجار لاستخدامها كخشب. ويجب أيضاً استخدام الحد الأدنى من مياه الري والأسمدة لزراعة هذه المحاصيل والأخشاب لكي يكون الوقود الحيوي المستخرج قادراً على التنافس على أسس اقتصادية. ومع تذكر هذه الاعتبارات يتوقع أن تصبح مناطق معينة مهمة لإنتاج موارد الطاقة الحيوية (الشكلين 11.2 و12.2)



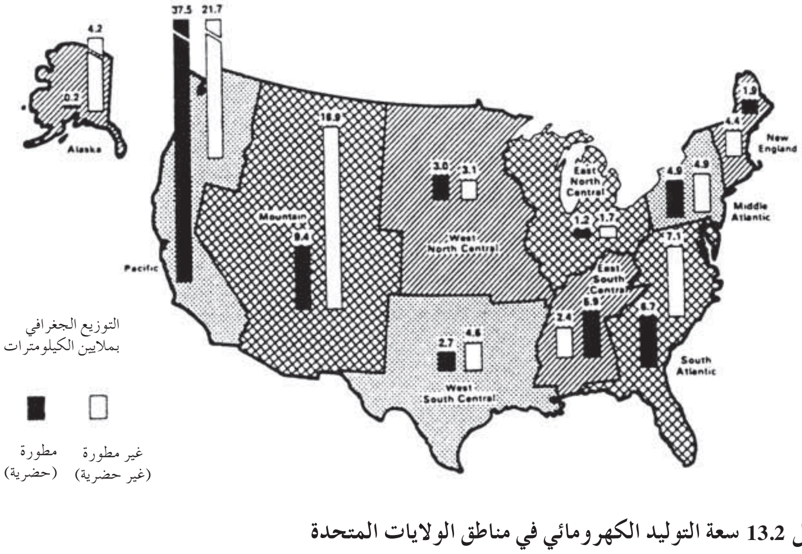
الشكل 11.2: مواقع إمداد الخشب كطاقة في الولايات المتحدة الأميركية
المصدر: بور وآخرون (Boer, et al. , 1986)



الشكل 12.2: مواقع إنتاج متوقعة لتوفير الطاقة الحيوية من دون ري بسماح من U.S. Dept. of Energy,
and U.S. Dept. of Agriculture, 1992.

القوة الكهرومائية هي بالطبع واقع قيد العمل في معظم أنحاء العالم اليوم. ومقدار الطاقة التي تساهم بها القوة الكهرومائية للاستهلاك البشري محدد بمصادر المياه المتوافرة بحالة مناسبة للتوليد (انظر الفصل 3) وتلبي المحددات المطلوبة للحماية البيئية. وتوفّر الطاقة المائية في الولايات المتحدة حالياً 8.5 في المئة تقريباً من الإنتاج السنوي للطاقة الكهرومائية البالغ 3.2 تريليون كيلوواط – ساعة. وأن الكهرباء ذاتها تشكل 38 في المئة من إنتاج الطاقة الإجمالي في القطر. وتبين الخريطة في الشكل 13.2 التوزيع المناطقي لإمكانات التوليد بالطاقة المائية حيث يمكن أن نلاحظ أن أكبر إمكانية لتوليد الطاقة الكهرومائية في الولايات المتحدة هي في منطقة الشمال الغربي المحاذية للمحيط الهادي.

في ما عدا التوليد بالطاقة الكهرومائية، بالطبع، فإن الموارد المتجددة ليست متوافرة حتى الآن بالأسس الواسعة نفسها للوقود الأحفوري. إن تطوير التكنولوجيات المطلوبة للوصول إلى الاستخدام الاقتصادي الواسع للموارد المتجددة ما زال إلى درجة كبيرة قيد التطوير وأن النتائج المتوخاة لأي منها لا تزال غير مؤكدة في الوقت الراهن. ولا يمكن أن يقرر بأي قدر من التوكيد متى سيتحقق النجاح. وتتضمن الفصول 10 و11 والمحلق (ج) مناقشة عمليات البحث والتطوير لهذه التكنولوجيات ووضع كل منها.



الشكل 13.2 سعة التوليد الكهرومائي في مناطق الولايات المتحدة

المصدر: Hydroelectric Power Resources of the United States; Developed and undeveloped, Federal Energy Regulatory Commissions Jan- 1- 1992.

الآراء المتضاربة بخصوص استنفاد الموارد ومحدداتها وتوسعها وتطورها المستدام

تمر مصادر الطاقة الأحفورية الآن بمرحلة استنفاد بينما لا توفِّر المصادر المتجددة إلا نسبة مئوية صغيرة من احتياجاتنا إلى الطاقة، وليس من المؤكد متى ستصبح متوافرة فيه بصورة واسعة. لكن إذا ما بقينا معتمدين على المصادر الأحفورية حتى تصبح مستنفدة ألا نكون مجازفين مع ما يترتب على ذلك من نتائج خطيرة على ثروتنا ورخائنا؟ هل يجب علينا القيام بعمل ما الآن لاستباق هذه النتائج؟ وإذا ما اتفقنا على ذلك فما هو نوع العمل؟

إن الإجابات عن هذه الأسئلة ليست على أي حال واضحة تماماً. فهناك اختلاف واسع على ما يجب عمله، وفي ما إذا كانت هناك مشكلة في المقام الأول. إن هذه التوجهات والحلول المقترحة قد تعكس جزئياً، كما لاحظنا سابقاً تأثير مصالح خاصة. فالمؤيد لمصالح المستهلكين قد يحاول مثلاً إقناعنا بأن الموارد يجب أن تستغل بسرعة للحفاظ على أسعار منخفضة. فقد تريد شركة طاقة، ما، تبنّي خطة لاستخراج الوقود الأحفوري بصورة بطيئة لكي تحافظ على أسعار وأرباح عالية. غير أن قضية استنفاد الموارد أدت إلى ظهور مدافعين ولكن بأساليب مختلفة جداً لأسباب فلسفية أو لمصلحة شخصية. ومعظم هذه المواقف هي أشكال مختلفة للمنظور التحديدي والتوسعي.

فالمنظور التحديدي يؤكد أن الموارد الطبيعية ذات طبيعة محددة وأن علينا أن نتعامل الآن مع واقع أنها ستستنفد. إضافة إلى ذلك فإن الاستغلال السريع سيكون سيئاً حتى مع انتفاء خطر الاستنفاد، فهو سبب للتلوث ولاستلاب الأرض، ويجازف بتغير المناخ كما يهدد كافة أنواع الحياة من خلال تدمير المحيط الحيوي ذاته. والتحديديون أساساً متشائمون حول قابلية التكنولوجيا على توفير الحلول السريعة لهذه المشاكل، وهم في الحقيقة متشائمون بصورة عامة حول ما يخبئه المستقبل للعالم بسبب المشاكل المتعلقة بالموارد الطبيعية. فبعضهم يرى إمكانات تنذر بالسوء فعلاً إذا لم نتخذ خطوات شديدة الوقع الآن للحد من استغلال الموارد. وهم يتوقعون إمكان حدوث كارثة عالمية بإمكانها على الأقل تدمير المجتمعات الصناعية وجلب

الشقاء لملايين البشر. ويتمثل وضع التحديديين في كتاب دونيلا ودنيس ميدوز (Donnella and Dennis Meadows) **حدود النمو** (*Limits to Growth* 1974، 1992) الذي صوّر من خلال المحاكاة بواسطة الحاسوب، لماذا قد تتجه المجتمعات الصناعية نحو الانهيار[9]. وينادي معظم التحديديين بسياسات تحدد (بالقوة إذا ما كان ذلك ضرورياً) استغلال الموارد والتلوث وعدد السكان وحتى النمو الاقتصادي ولا غرابة في ذلك.

إذا ما كانت هذه الحجج صحيحة فمن الصعب من منظور أخلاقي أن تجادل ضد وصفات التحديديين لخططهم. وكيف يمكننا الاستمرار باقتراف أفعال تساهم في تقويض الحضارة أو في انهيار النظام الإيكولوجي؟ إن مثل هذه الأعمال التخريبية يجب أن تعتبر بوضوح شراً عظيماً وأن يعتبر العمل على استباقها أو منعها عملاً خيّراً. ومع ذلك يجب أن يلاحظ أيضاً أن الأخذ بهذه المبادرات ستكون له نتائج فورية ليست بالضرورة ذات فائدة. فتحديد النمو مثلاً قد يحرم الفقراء من الناس من السلع المادية، كما سيحد من الحرية الشخصية من خلال القيود الحكومية على الاستهلاك. ومع ذلك، فإن هذا الحرمان وهذه التغييرات لن تكون مستندة إلى شر موجود، بل بالأحرى إلى شر مفترض.

لقد كان هناك في الواقع عدد من الانتقادات على حجج التحديديين. فقد لاحظ النقاد أن المحاكاة التي لجأ إليها ميدوز استخدمت افتراضات مشكوك فيها. وعندما تغيرت هذه الافتراضات أصبحت التوقعات للمستقبل أقل خطورة بكثير. لكن النقاد أشاروا أيضاً إلى أن نظريات الكارثة ليست شيئاً جديداً وأن النظريات السابقة لم تسندها الوقائع.

ربما تكون نظرية الكارثة للفيلسوف والاقتصادي البريطاني توماس مالتوس (1766

---

9 تستبق بعض حجج التحديديين الملحوظة كتاب *Limits to Growth* وخاصة تلك التي قدمها أرليش وهاردن (Ehrlich and Hardin). انظر النقاش والمراجع في الفصل الخامس. وقد أصبح هيرمان دالي (Herman Daly) الاقتصادي في البنك الدولي التحديدي الرائد منذ نشر كتاب ***Limits to Growth***. ويجب على الاقتصاد بحسب وجهة نظره أن ينمو بصورة معتدلة بهدف الحفاظ على نظام العالم البيئي. وستقوم الصورة المعتدلة بتحديد أو عدم السماح باستمرار النمو لكنه يميز بين النمو (Growth) والتطور (Development) والذي يعني بالنسبة إليه التحسين.

– 1834) المثال التاريخي الأشهر. فقد توقع في بداية القرن التاسع عشر أن نمو السكان سيفوق الإنتاج الزراعي وستلي ذلك مجاعات شاملة. وكانت حجته رياضية في جزء منها، فالسكان سيزداد عددهم بوتيرة هندسية، كما ادعى، فيما يتوسع الإنتاج الزراعي بنسبة حسابية. وكانت لدى مالتوس أسباب جيدة الحجة لكنها كانت خاطئة لأن تقديراته للسكان كانت مغالية، بينما استخف تقديره بالإنتاج الكافي للزراعة. وبعبارة أخرى إنه استخف بالتكنولوجيا.

وما يكمن وراء إيمان التوسعيين بإمكانات التكنولوجيا هو التفاؤل (انظر Kahn, Brown's and Martel, 1976, and Simon, 1981). ويتمسك هذا المنظور بضرورة استثمار الموارد بالسرعة التي تبرز فيها الحاجة إلى النمو الاقتصادي. أو، بصورة أكثر شدة، أن المصادر يجب أن تستثمر بأي وتيرة مطلوبة للنمو الاقتصادي. والتوسعيون ليسوا غافلين عن إمكانية استنفاد الموارد لكنهم ليسوا قلقين للنتائج. وكما عبَّر عن ذلك أحدهم «إن التكنولوجيا في الحقيقة تستمر في ابتداع موارد جديدة» (مقتبسة من: Simon, 1981).

مواقف التحديديين والتوسعيين تجسدها الازدواجية التي أظهرها المجتمع الصناعي تجاه التكنولوجيا التي أوجدته. فاعتقاد التوسعيين في حل هندسي أو تكنولوجي[10] للمشاكل التي تواجهنا راسخ في تجارب القرن العشرين. وقد رأينا تقدماً تكنولوجياً فاعلاً ولدينا اعتقاد في إمكاناته. لكن عدداً من الناس يرون في التكنولوجيا خسة في الوقت ذاته. فرغم أن ماكينة قد تبدو محايدة أخلاقياً إلا أن وجودها لا يمكن تفريقه عن استخداماتها. ويذكرنا منظور التحديديين بأن استخدام التكنولوجيا يولد مشاكل أخلاقية واجتماعية: التلوث وضغوط السكان واستنفاد الموارد وما إلى ذلك. ويجهر التحديدي برأيه القائل إن علينا أن نطوّع التكنولوجيا قبل أن تدمرنا تأثيراتها.

أما بالنسبة إلى التوسعيين فستوفِّر التكنولوجيا الإجابات عن مشاكل اليوم كما وفَّرتها عن مشاكل الأمس. وقد يقر التوسعي بأن النفط والغاز محدودان لكنه على قناعة بأن التكنولوجيا ستوفِّر الحلول أو البدائل قبل أن يحصل الاستنفاد. ويحاول

10 استخدمت دراسة عن الطاقة أعدتها مؤسسة فورد سنة 1974 تعبير «حل تكنولوجي» (Technical fix) تطبيقه على سيناريو محدد للطاقة. ونعني هنا، أن المجتمعات ستطور حلولاً تكنولوجية ملائمة لكثير من مشاكلها.

الاقتصادي جوليان سيمون (Julian Simon) (1981) إقناعنا بأننا ما إن نبدأ بفقدان مادة ما، إلا وسنجد سريعاً طرقاً أخرى لتلبية احتياجاتنا. وسيجري حل مشكلة التلوث بأساليب تكنولوجية أيضاً. أما النمو السكاني فلا يرى فيه التوسعي أي مشكلة، بل إنه يوسع مجموع العاملين ويعني بشراً أكثر يستخدمون مهاراتهم في حل مشاكل المستقبل (Simon, 1981).

ويرى هذا المسلك التفكيري في النمو الاقتصادي القوي حافزاً لابتكار الحلول لأن نظاماً اقتصادياً نشيطاً سيُديم ذاته. وسيكون هناك بحسب ما يقول دعاة النمو، طلب هائل لتكنولوجيات طاقة جديدة. وسيكون ذلك للمبادرين الابتكاريين محفزاً (ربح عالٍ) لإيجاد وتطوير الوسائل لحل مشكلة استنفاد الموارد. ويمكننا في الوقت الحالي التمتع بالنمو الاقتصادي كما سيتسنى للشعوب كافة رفع مستوى معيشتها.

إن فكرة التوسعيين تفاؤلية عن مستقبل التكنولوجيا وعن إمكانية نظام السوق الاقتصادية الحرة على تكييف ذاتها لكي تتغلب على مشاكل لا علاقة لها بأرباح وخسارة المدى القريب (Simon, 1981)[11]. ولا يقتصر الأمر أن تغدو التكنولوجيا وسيلة أكثر كفاءة في مضمون السوق الحرة، بل أن تصبح طريقة لتحسين وضع الإنسانية جمعاء. ومقاربة التوسعيين مثل حجج التحديديين، ليست إلا موقفاً أخلاقياً، لكن نقطة التركيز قد تغيرت. فهم يسعون إلى تعظيم النمو الاقتصادي والحرية في وقت واحد، الآن أو في المستقبل رغم أن ذلك مبني على افتراض ـ وليس على حقيقة أكيدة ـ يقول إن المستقبل سيجد طريقة للعناية بنفسه.

وتؤكد نظرة التحديديين أن حل المشاكل الحالية يكمن في وضع حدود للاستغلال والتطوير، بينما يرى التوسعيون أن الحل يكمن في «النمو». ويبدو أن هذين الموقفين ينفي أحدهما الآخر. فنحن نستطيع أن نحصل على النمو أو على التحديد إنما ليس على كليهما معاً.

---

11 هناك تقليد قديم للتفاؤل التكنولوجي بوصفه موقفاً فلسفياً. فقد كتب الفيلسوف الإسكتلندي أندرو أوري (Andrew Ure) (إعادة طبع 1967) مثلاً في القرن التاسع عشر عن «النعم التي أسبغها العلم الفيزيائي – الميكانيكي على المجتمع» وعن قابليته على «تحسين واقع الجنس البشري» إلى حدود أبعد. وآمن أوري بحاجة التكنولوجيا إلى اقتصاد السوق الحر لكي تزدهر.

ومع ذلك فقد جرى إدخال مفهوم جديد ومهم في الثمانينيات وأوائل التسعينيات كان واعداً في تسوية الخلاف بين التحديد والنمو وكان المفهوم يدعى التنمية المستدامة (Sustainable Development). ورغم أن الفكرة كانت قد ظهرت في أوائل الثمانينيات[12] إلا أنها لم تتبوأ أهمية عالمية إلا من خلال اجتماع للهيئة الدولية للبيئة والتطوير (Brundtland Commission, 1987). وكان المقصود في الفكرة أولاً تطبيقها على تطوير العالم الثالث إلا أن هذا التطبيق توسع.

والفكرة الكامنة تبعاً لوثيقة 1987 هي أن «على التطور تلبية احتياجات الحاضر من دون المساومة على مقدرة أجيال المستقبل على تلبية حاجاتهم». وكان النمو الاقتصادي ممكناً لكن على الاقتصاد أن يتواجد «في توازن مع موارد الأرض والنظام الإيكولوجي الطبيعي».

من ناحية أخرى ما الذي يعنيه هذا «التوازن» بتعابير عملية؟ فكرة التنمية المستدامة جرى تبنيها من قبل العديد، ومع أن العبارة شائعة الاستخدام إلا أن معناها قابل للتغير. وقد برهنت التجارب على صعوبة وضع تعريف دقيق لها، وجاءت التفسيرات نتيجة ذلك متباينة مثل ما كانت دوماً وبخاصة من حيث تحقيق الاستدامة (Sustainability) من خلال وضع السياسات.

احتضن التحديديون مفهوم التنمية المستدامة بتلهف لكنهم ركزوا على الكلمة الأولى. وقد جرى تفسير المستدامة لتعني الحاجة إلى إعادة هيكلة الاقتصاديات بصورة «جوهرية» وإلى إيقاف النمو السكاني، ونقل الثروة والتكنولوجيا من قبل الأمم الغنية إلى الأمم الفقيرة[13]، ويجب أن يتغير نمط الحياة في الدول المتطورة. وعلينا أن نتبنى ما يدعى «الاعتدال المتطور» (Sophisticated Modesty) كنمط حياة أبسط واعتماد أقل على استهلاك الطاقة. و«التطوير» (Development) فوق كل شيء سيكون متميزاً عن النمو الاقتصادي. وربما يتقلص الإنتاج رغم أن بإمكاننا استبدال كثير من السلع بسلع أجود وبذلك نحقق تطوراً من دون نمو.

12 في أيار/ مايو 1984 عقد معهد موارد العالم مؤتمراً عن «الممكن كونياً». ومن بين البيانات التي أصدرها المؤتمر كان أحدها عن «تحول اقتصادي إلى التنمية المستدامة ومساهمة أوسع في فوائدها» (انظر Repetto, 1985).

13 هذه من مقالة: Emily T. Smith, «Growth vs Environment,» Business Week (11 May 1992), pp. 66 – 75.
وتُعزى فكرة إعادة الهيكلة إلى مقالة كتبها ليستر براون (Lester R. Brown) رئيس World Watch Institute.

في حين ركز التحديديون على فكرة الاستدامة بدل التطور قام التوسعيون بالتشديد على معكوس ذلك. وبقي النمو الاقتصادي في هذا المنظور هدف كل المجتمعات. لكن الاستثمار في مصانع ومعدات أحدث وأفضل سيأخذ الأسبقية في الاستهلاك المحض. وسيبني المجتمع بهذه الطريقة قابليته الإنتاجية معززاً إمكانات الأجيال القادمة (Solow, 1991).

ولكي يُنجز ذلك، على الحكومة إيجاد محفزات سوقية قد تكون من خلال القوانين الضريبية. ويعتقد التوسعيون بصورة عامة أيضاً[14] أن التطوير يجب أن يتبنى «الحماية البيئية». ويفترض أيضاً أن الحوافز ستوجه نحو تقليل التلوث وربما يكون ذلك من خلال دمج كلفة الآثار البيئية في سعر المنتوج الصناعي. وربما تركز الحوافز أيضاً على تطوير تكنولوجيات أكثر كفاءة وأقل استهلاكاً للطاقة. وسيؤكد التوسعيون على أهمية حقوق الملكية الخاصة أيضاً لأن الافتراض يقول إن الأفراد لديهم حوافز للحفاظ على «رأس المال الطبيعي» الذي يمتلكونه لكي يكون مربحاً في المستقبل.

تبدو هذه التفسيرات متضاربة مثل النقاشات السابقة للتحديديين والتوسعيين. ومع ذلك فإن مفهوم التنمية المستدامة، كما يبدو، يقدّم أرضية وسطية تربط النمو بالمستدامية مع سياسات حكومية أكثر فاعلية مما ينادي به التوسعيون.

يمكن للمستدامية بالنسبة إلى الموارد أن تبدأ بالقواعد الإرشادية التالية «ينبغي ألا تستهلك الموارد الطبيعية (أو تستخدم) بوتيرة تقل عن وتيرة إعادة توليدها في الطبيعة أو تساويها» في حين بالإمكان استنفاد الموارد غير المتجددة إنما بـ «كفاءة مثلى» (Pearce and Turner, 1990). وتقترح هذه الأسس سياسات تؤكد على تكنولوجيات أكثر كفاءة وإدارة الموارد المتجددة (وبخاصة الكتلة الحيوية) بطريقة أكثر حذراً وتطوير المتجددات – بدعم ملحوظ من الحكومات في مجالات البحث والتطوير خصوصاً.

وفي حين يبدو هذا البرنامج وكأنه نمو طبيعي لمفهوم المستدامية ينبغي ألا يغيب عن الذهن أنه كلما ازداد التوكيد على الموارد المستدامة كان الشك أكثر تأصلاً في

14 انظر: Thomas J. DiLorenzo, The Mirage of Sustainable Development, Contemporary Issues Series No. 56 (Pamphlet), Jan. 1993, Center for the Study of American (CSAB), St. Louis, MO.

البرنامج. فالموارد المستدامة ليست بتلك الوفرة حتى الآن لتحل محل الوقود الأحفوري حالياً على نطاق واسع. لذا فإن السياسات التي تجبر المجتمع على أن يصبح أكثر اتكالية على الموارد المستدامة في المستقبل قد تكون خطأً مكلفاً.

كان البنك الدولي اقترح (World Development Report, 1992) خطوطاً إرشادية أكثر عمومية لكل من صانعي السياسات الوطنية والدولية. ويدافع تقرير البنك بصورة عامة عن سياسات للنمو الاقتصادي تلجأ إلى «استخدام كفء للموارد وإلى نقل التكنولوجيا وإلى أسواق تعمل بصورة أفضل»، وكذلك إلى سياسات تحدد نمو السكان. لكن على الحكومات أيضاً «أن تتفهم القيمة الصحيحة للبيئة» وتخلق الحوافز لممارسات بيئية سليمة. أكثر من ذلك يجب تبعاً للتقرير أن يكون هناك بحث ونشر أفضل للمعلومات وتطوير لمهارات الناس في الاستخدام الكفء للموارد. ويجب أن يكون هناك أيضاً توكيد على الحظر أو المنع، وذلك لأن «الحظر أرخص من العلاج».

الاستدامة بالطبع وإلى حد بعيد مشكلة عالمية. فالتصحر في دول العالم الثالث يؤثر في مناخ كل واحد. كما إن الاستهلاك السريع للوقود الأحفوري في الدول المتطورة يستنفد هذه الموارد بالنسبة إلى العالم النامي في المستقبل. وبذلك تحتاج سياسات الاستدامة إلى تنسيق بين الكثير من الكيانات السياسية الوطنية – مع أيديولوجياتهم وأهدافهم الوطنية المتضاربة أحياناً. وكان بعض التنسيق ممكناً في السنين القليلة الماضية ومن ذلك معاهدة الحد من انتشار الأسلحة النووية أو اتفاقية حماية طبقة الأوزون. وتتعلق وصفات البنك الدولي بدرجة رئيسة بالمساعدة الخارجية والأسواق المفتوحة والبحث المنسق. لكن تنسيق السياسات القومية أمر صعب. وهناك في الوقت ذاته جهود استثنائية لكنها متفرقة حول العالم لتنفيذ سياسة الموارد المستدامة. وقد قبلت الحكومات في كثير من الحالات واقعياً البرنامج التوسعي الأقدم لكنها لا تفعل إلا القليل. وهكذا يصبح عدم تغيير السياسة قراراً سياسياً مهماً ـ قراراً قد يكون له نتائج مهمة للأجيال القادمة.

المراجع

Barber, W. J. *History of Economic Thought*. New York: Penguin, 1967.

Blair, J. The Control of Oil. New York: Random House, 1978.

Boer, K. W. [et al.] (eds.). *Advances in Solar Energy*. *Boulder*, CO: American Solar Energy Society, 1986. Vol. 3.

Brower, M. C. [et al.]. Powering the Midwest - Renewable Electricity for the Economy and the Environment. Cambridge, MA: Union of Concerned Scientists, 1993

Brundtland, *G. H. Our Common Future, The World Commission on Environment & Development*. Oxford, UK: Oxford University Press, 1987.

Burnett, W. M. and S. D. Ban, Changing Prospects for Natural Gas in the United States. *Science*: vol. 244, 21 April 1989. pp. 305-310.

Cole, H. S. D., C. Freeman, M. Iohoda and K. L. Davitt. *Models of Doom-A Critique of Limits to Growth*. New York: Universe, 1973.

Commoner, B. *The Politics of Energy*. New York: Knopf, 1979.

Davis, C. V. and K. E. Sorensen. *Handbook of Applied Hydraulics*. 3rd. ed. New York: McGraw-Hill, 1969.

Dorf, R. C. *Energy, Resources, and Policy*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1978.

Enron Corp. The Outlook for Natural Gas. Houston, TX: 1993.

Forrester, J. W. *World Dynamics*. Cambridge, MA: Wright-Allen, 1971.

Heiman, E. (reprint). *History of Economic Doctrines*. New York: Oxford University Press, 1974.

Hubbert, M. K. *«Survey of World Energy Resources.»* Canadian Mining and Metallurg. Bull: vol. 66, July 1973. pp. 37-53. (Also reprinted in M. G. Morgan, ed. 1975. Energy and Man. IEEE Press, New York).

Kahn, H., W. Brown and L. Martel. *The Next 200 Years: A Scenario for America and the World*. New York: Morrow, 1976.

Masters, C. D., R. M. Root and R. M. Turner. «World Resource Statistics Geared for Electronic Access.» *Oil & Gas Journal*: 13 October issue, 1997.

Meadows, D. H [et al.]. The Limits to Growth. New York: Signet, 1974. (Second edition in 1975, Signet Books, New York)

Meadows, D. H. and D. L. Meadows. *Beyond the Limits*. *Burlington*, VT: Chelsea Green Publishers, 1992.

Morse, F. T. *Elements of Applied Energy*. New York: Van Nostrand, 1974.

Pearce, D. W. and R. K. Turner. Economics of *Natural Resources and the Environment*. *Baltimore*, MD: Johns Hopkins University Press, 1990.

Penner, S. S. and L. Icerman. *Energy*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1974. vol. I.

Demands, Resources, and Policy.

Repetto, R. *The Global Possible*. New Haven, CT: Yale University Press, 1985.

Schurr, S [et al.] *Energy in America's Future: The Choices before us*. Baltimore, MD.: Johns Hopkins, 1979. (See Chapter 7: «Mineral Fuel Resources»).

Simon, J. L. *The Ultimate Resource*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1981.

Solow, R. M. *Sustainability: An Economist's Perspective*. Wood's Hole, MA: J. Seward Johnson Lecture, Marine Policy Center, Wood's Hole Oceanographic Institution, 1991.

Stobaugh, R. and D. Yergin. *Energy Future: Report of the Harvard Business School*. New York: Random House, 1979 (Third edition in paperback. 1983. Vintage Books, New York).

U.S. Department of Energy. Energy Information Administration. October, 1994. US Crude Oil, Natural Gas and Natural Gas Liquids Reserves, 1993 Annual Report, Washington, DC.

U.S. Department of Energy. Energy Information Agency. Monthly Energy Review.

US Geological Survey. 1995. National Assessment of United States Oil and Natural Gas Resources. USGS Circular 1118, Washington, DC, 1995.

Ure, A. *The Philosophy of Manufactures*. New York: Augustus M. Kelley, 1967.

Wildavsky, A. and E. Tennenbaum. *The Politics of Mistrust*. Beverly Hills, CA.: Sage, 1981.

Wilson, C. L. (project director). *Energy: Global Prospects 1985-2000, Report of the Workshop on Alternative Energy Strategies (WAES)*. New York: McGraw- Hill, 1977.

Wilson, C. L. (project director). *Coal- Bridge to the Future: Report of the World Coal Study (WOCOL)*. Cambridge, MA.: Ballinger, 1980.

الفصل الثالث

الطرق التقليدية لتحويل الطاقة

تحويل الطاقة

لغرض توفير القدرة للمجتمع الصناعي، يجب تحويل مصادر الطاقة إلى عمل مفيد. والحقيقة أن الأعجوبات التقنية للعالم الحديث تعتمد على عدد محدد مما سندعوه تكنولوجيات تحويل الطاقة التقليدية والتي كانت أسسها معروفة لقرن من الزمن أو أكثر. ومعظم هذه التكنولوجيات هي مكائن حرارية. كذلك كانت القوة المائية ولزمن طويل مصدراً للطاقة وهي توفّر الآن نحو خُمس طاقة توليد الكهرباء في الولايات المتحدة. لكن ذلك لا يمثل سوى 4 في المئة من استهلاك الطاقة من الأنواع كافة وهي تكنولوجيا التحويل الوحيدة المستخدمة التي لا تعتمد الحرارة. وبعض تكنولوجيات الطاقة البديلة مثل تحويل طاقة الشمس أو طاقة الريح ليست من نوع المكائن الحرارية أيضاً. لكن هذه البدائل لم تحز إلا على تغلغل بسيط في سوق الطاقة حتى هذا التاريخ رغم الاهتمام الذي نالته خلال عقد السبعينيات (انظر الفصل 10 والفصل 11).

والحقيقة أن تكنولوجيات الطاقة استندت في الدرجة الأولى إلى الطاقة الحرارية منذ بدء الثورة الصناعية حتى يومنا هذا. ويبدو أن هذا التركيز على التحويل الحراري يحتمل أن يستمر في المستقبل. ولم يقتصر الأمر على الاستثمارات الهائلة في التكنولوجيا الحالية، إذ إن بعض البدائل المستقبلية وبخاصة تلك التي تستخدم الوقود التركيبي (Synthetic Fuels) تستند أيضاً إلى التحويل الحراري. وحتى التكنولوجيا النووية سواء أكانت انشطارية أم اندماجية هي أنماط من المكائن الحرارية. والشيء الوحيد الذي سيغير هذا الاعتماد التاريخي على التحويل الحراري هو اختراق

تكنولوجي ـ وتجاري رئيس في التحويل الشمسي المباشر (انظر الفصل 10 والملحق ج).

التحويل الحراري التقليدي

يشمل صنف آلات التحويل الحراري المباشر نوعين ذوي أهمية خاصة وهما: محطة القدرة البخارية، وهي الطريقة الرئيسة لتوليد الكهرباء إلى حد بعيد ومحرك الاحتراق الداخلي، وهو مصدر القدرة الأساسي للنقل في المجتمع الصناعي. والحقيقة أن نوعين مختلفين قليلاً من محركات الاحتراق الداخلي – محرك البنزين ومحرك الديزل ـ يوفران نحو تسعة أعشار كافة أنواع نقل الركاب ونحو ثلث كل خدمات نقل البضائع في الولايات المتحدة.

وقد وجدت آلة الديزل موقعاً لها في محطات توليد القدرة الكهربائية الصغيرة أيضاً. ويظهر النوع الآخر من محركات الاحتراق الداخلي وهو التوربين الغازي بصورة متميزة في توليد الكهرباء أيضاً.

غير أن الكهرباء لا تزال تولَّد في الدرجة الأولى من محركات بخارية ذات احتراق خارجي. وسنبدأ نقاشنا عن التكنولوجيات التقليدية للطاقة بنظرة على المحركات البخارية ومحطة توليد القدرة الكهربائية بالبخار.

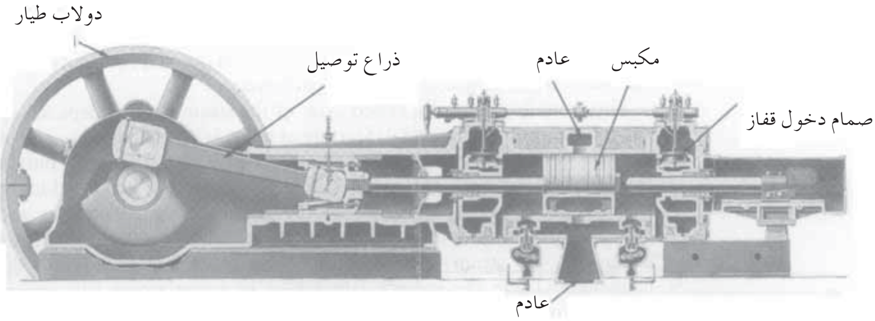
المحركات البخارية

تعمل المحركات البخارية تبعاً لدورة رانكن[1] (Rankine Cycle) وتتبع مسارات ثيرموديناميكية تسير بحسب تغيرات الضغط والحجم في البخار عندما يتبع المحرك دورة عمله. وما يقرر المسارات جزئياً في دورة رانكن هي المميزات الخاصة لمادة العمل عندما تتغير من ماء إلى بخار أو من بخار إلى ماء (انظر الملحق (أ) لغرض مراجعة القواعد الثيرموديناميكية).

والمثال التقليدي لدورة رانكن هو المحرك البخاري الترددي الذي وفَّر الطاقة

1 سميت باسم و. ج. م رانكن (W. J. M. Rankine) (1872 – 1820) وهو مهندس وعالم وموسيقي وأستاذ في جامعة كلاسكو في إسكتلندا. وقد قدم مساهمات ملحوظة في المحركات البخارية والميكانيك وبناء السفن.

لماكينات المصانع في القرن التاسع عشر، وهو شبيه بتلك التي استخدمت في القاطرات في النصف الأول من القرن العشرين. ويمكننا أن نرى في الشكل 1.3 مكبساً داخل أسطوانة مرتبطاً بدولابٍ طيار (Fly Wheel) بواسطة عمود إدارة (Drive Shaft). وهناك أيضاً صمامات إدخال وتفريغ على الأسطوانة. وعمل الماكينة الأساسي ربما يكون معروفاً. فالبخار يدخل إلى الأسطوانة أولاً من اليمين. وعند تمدده يدفع المكبس أفقياً إلى اليسار. لكن بعد زخم البخار تجبر الحركة التي أعطيت إلى الدولاب الطيار المكبَس للعودة إلى اليمين. وخلال ذلك يطرد البخار المستهلك. وتسيطر حركة المكبس والدولاب الطيار على الصمامات التي تنظم دخول وخروج البخار. وطالما استمرت تغذية البخار إلى تجويف المكبس فستستمر الحركة الترددية. والمحرك البخاري الترددي مثال لدورة ثيرموديناميكية مفتوحة وذلك لأن مادة العمل ـ وهي البخار ـ تُطرد من المنظومة بعد استخدامها.



الشكل 1.3
المحرك البخاري الارتدادي. مهداة من Skinner Engine Company, Erie, PA.

والتغيرات التي تحدث في ضغط وحجم البخار عندما تحدث دورة التردد يمكن أن تُمثل على مخطط الضغط ـ الحجم (p-V). فالمسار على مخطط p- V يمثل التغيرات في الضغط التي تصاحب التغير في حجم مادة العمل (وهي البخار في هذه الحالة) في الماكينة الحرارية (انظر الملحق أ).

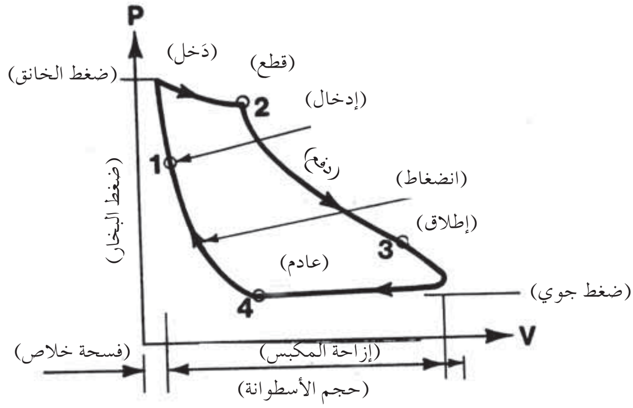
نرى في الشكل 2.3 أربعة مسارات لدورة رانكن:

المسار1-2: البخار داخلاً (حرارة).

المسار2-3 : تمدد البخار (زخم).

المسار 3-4: طرح البخار (تفريغ).

المسار 4-1: الانضغاط



الشكل 2.3

مخطط الضغط – الحجم (p-V) للماكينة التجارية الارتدادية. مقتبس من F.T. Morse 1947 power Plant Engineering Van Nostrand. N.Y

ونقدر أيضاً أن ندرس هذا الشكل بمصطلحات وضع الصمامات التي تتحكم في دخول البخار وتفريغه.

النقطة 1: الإدخال (Admission) يبدأ البخار بالدخول عندما يفتح صمام الإدخال ويبقى صمام التفريغ مسدوداً.

النقطة 2: القطع (Cut off) يحدث قطع صمام الإدخال، وبذلك يصبح الصمامان مقفلين للجزء 2-3 من المسار.

النقطة 3: الإطلاق (Release) عندما يفتح صمام التفريغ بينما يبقى صمام الإدخال مسدوداً.

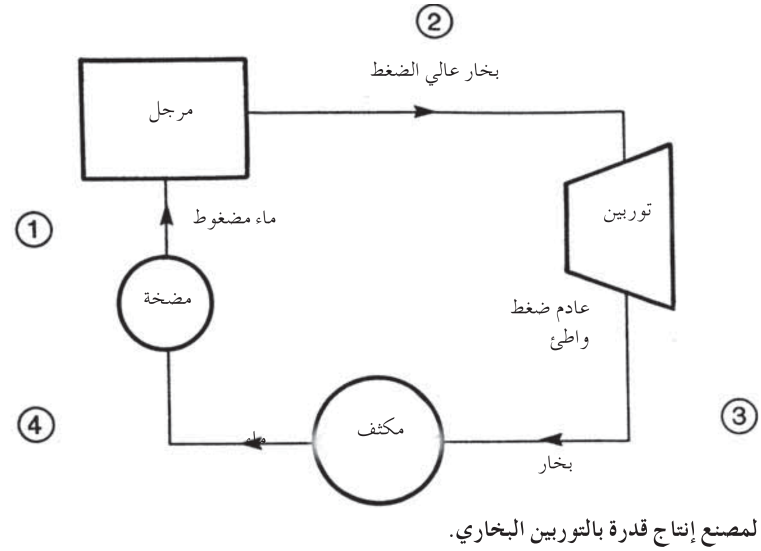
النقطة 4: الانضغاط (Compression) يبدأ عند بدء صمام التفريغ بالانسداد ثانية حيث يصبح الصمامان مسدودين.

ولا تستخدم محطات القدرة البخارية المكائن الترددية بعد الآن لتوفير شغل ميكانيكي، بل تستخدم بالأحرى توربيناً بخارياً يعمل عادة في دورة ثيرموديناميكية

مقفلة. وفي الدورة المقفلة تدور مادة العمل باستمرار من دون أي استبدال مادي. من الناحية الثيرموديناميكية تعتبر مسارات p-V ببساطة عند المرور عليها مرة بعد مرة دورة ثيرموديناميكية.

يبين الشكل 3.3 مخططاً لدورة مغلقة لمحطة قدرة حديثة تعمل بالتوربين البخاري وتستخدم الماء – البخار كمادة عمل تدور حول مسار مقفل مادياً من المرجل إلى التوربين وإلى المكثف وثم إلى المضخة لتعود إلى المرجل.

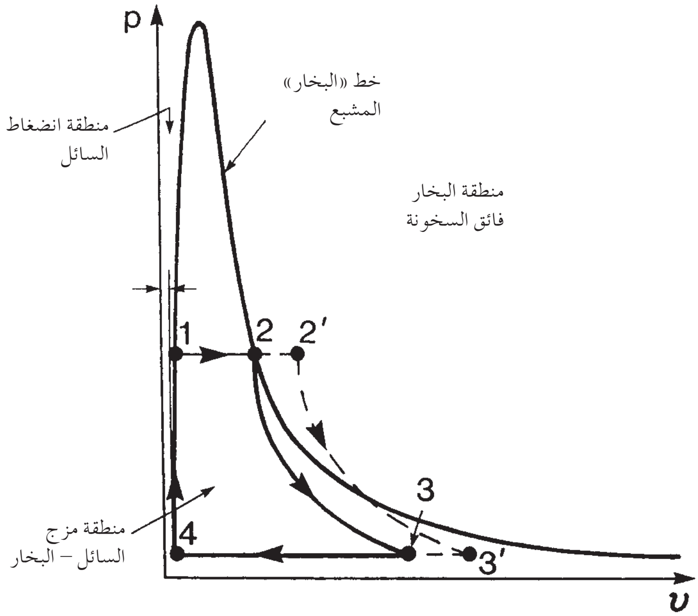
في الماكينة الترددية يُنفث البخار على عكس هذا إلى الخارج في نهاية كل دورة، ويصور الشكل 4.3 دورة البخار المغلقة على مخطط P-V. يغذي الماء بدءاً من (نقطة 1) تحت الضغط إلى المرجل حيث تحوله الحرارة إلى بخار. ويكون مخرج المرجل (النقطة 2) في الحقيقة بخاراً عالي الضغط وعالي درجة الحرارة يغذي التوربين. ويتمدد البخار خلال التوربين مسبباً دورانه، ما ينتج منه شغل ذو فائدة. وبعدما تنخفض درجة حرارة وضغط البخار بسبب التمدد يخرج من التوربين (نقطة 3) ليغذي المكثف. وهنا يفقد البخار حرارة التبخر الكامنة (وهي الطاقة المطلوبة لتحويل الماء إلى بخار) بواسطة ماء التبريد من دون أي تبادل للكتلة من سائل عامل ماء التبريد. ويتحول السائل العامل في المكثف إلى ماء – النقطة 4 في الدورة – تحت ضغط جوي أساساً*.



الشكل 3.3
مخطط توضيحي لمصنع إنتاج قدرة بالتوربين البخاري.

* عملياً يجري الحفاظ على المكثف بأوطأ ضغط ممكن وبحدود 2 إنش زئبق ضغط مطلق أو نحو 28 إنش زئبق من الفراغ. بهذه الطريقة يجري استغلال أكبر كمية ممكنة من الشغل من البخار.

ثم تقوم المضخة برفع ضغط الماء إلى المرجل وتتكرر الدورة بدءاً من النقطة 1. ودورة العمل هذه هي دورة رانكن المغلقة.



الشكل 4.3 مخطط P–V لمحطة بخارية ذات دورة مغلقة.

مسارات p-V في الشكل 4.3 لدورة رانكن المغلقة شبيهة، لكنها ليست مطابقة، لتلك التي في المحرك البخاري الترددي. فمسار التزود بالحرارة (1-2) لكليهما هو عملية ضغط ثابت ينتج من التحول من السائل إلى البخار. ويقوم المرجل عبر الجزء الأعظم من مسارp-V بإضافة الحرارة اللازمة لتحويل حالة مادة العمل من سائل إلى بخار. ويشابه مسار التمدد p-V للتوربين على شكل (2–3) نظيره للمحرك الترددي. أما مسار التفريغ (3–4) فهو عملية ضغط ثابت للدورة المغلقة كما هو للدورة المفتوحة في المحرك البخاري. وأخيراً فإن مسار الكبس (4–1) في دورة رانكن المغلقة يحدث أساساً في حجم ثابت خلال عمل المضخة المنفصلة.

يجري في دورة رانكن المغلقة عادة إيصال مادة العمل إلى حالة التسخين الفائق (Superheated) بالاستمرار بإضافة الحرارة بعد النقطة التي يتحول فيها الماء إلى بخار. وعند حدوث ذلك (في ملفات التسخين الفائق في المرجل) يمدد مسار تزويد الحرارة. وتبين النقطة ´2 في الشكل 4.3 حالة التسخين الفائق هذه. وامتداد المسار

(2—´2) مجرد خط أفقي، ذلك لأن التسخين الفائق ما زال يحدث في ضغط ثابت وهو ما يؤدي إلى زيادة الكفاءة الحرارية (Thermal Efficiency). ومعنى هذا أن نسبة الطاقة المتاحة للعمل المفيد إلى الطاقة المزودة تزداد (انظر الملحق أ).

غالباً ما يجري تعزيز الكفاءة الحرارية لمحطة التوربنيات البخارية الحديثة بوسائل أخرى. فيمكن مثلاً حرف جزء من البخار ليُعاد إلى المرجل قبل أن يمر خلال التوربين. وعند ذلك تجري إعادة تسخين البخار وإرجاعه إلى التوربين حيث يدخله قرب النقطة التي حُرِف فيها عن مساره الأولي. ويمكن لإعادة التسخين أن تحسن الكفاءة بنحو 3 في المئة (انظر الملحق (أ) لبحثٍ أكثر تفصيلاً عن الكفاءة الحرارية).

محطات القدرة البخارية

يمكننا في محطة قدرة بخارية أن نرى التحقيق المادي لدورة رانكن البخارية. ويبين الشكل 5.3 دورة تحويل الطاقة بكاملها بدءاً بتزويد الوقود (الفحم) في القمة وانتهاء بالتيار الكهربائي (محولة الفولتية العالية) على اليمين.

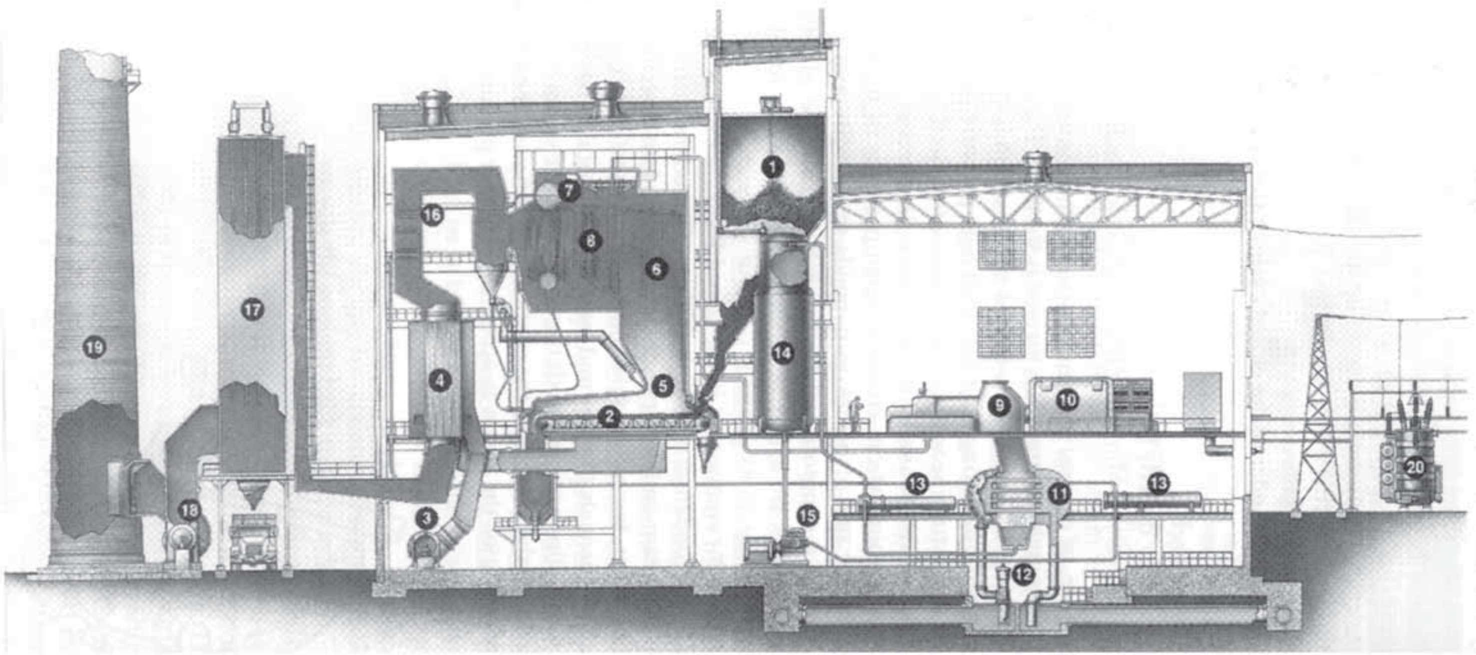
وإذا ما درسنا مكونات القلب الحراري (الشكل 3.5) بدءاً بالمرجل فسنرى:

1 ـ تحميل الوقود ـ يحمل حزام ناقل الفحم عبر القمة ويسقطه في مستودع الوقود.

2 ـ تزويد الوقود ـ يدفع مشبك معدني متحرك الفحم إلى داخل الفرن حيث يمتزج بالتيار القسري من الهواء المسخن ليحقق الاحتراق في صندوق الاحتراق

3 ـ تزويد الماء/ إنتاج البخار ـ تحوي أنابيب المرجل في صندوق الاحتراق مادة العمل التي تدخل بشكل ماء وتترك بشكل بخار في طريقها إلى التوربين البخاري.

إن احتراق الوقود ـ مع انتقال حرارته ـ يحدث في محطة بخارية حديثة في درجات حرارية عالية. وكما نلاحظ في الملحق (أ) هناك تأثير حاسم لدرجة الحرارة التي يجري تزويد الحرارة عندها في الكفاءة الثيرموديناميكية (أي مقدار الطاقة المستحصَلة من مدخول معين من الطاقة) للدورة. فكلما كانت درجة الحرارة أعلى كلما كانت الكفاءة المستحصلة أعلى. وتبلغ درجة الحرارة في محطة قدرة تستخدم الوقود الأحفوري في اللهب ذاته بحدود 3000 درجة فهرنهايت. أما غازات الاحتراق الساخنة في غرفة الاحتراق بجوار اللهب مباشرة فحرارتها تترواح على أي حال بين 2100 إلى 2300 درجة فهرنهايت.



17–مرسب كهروستاتيكي	13–سخان مساعد	9–توربين	5–محرقة، حارق	1–مستودع خزن
18 –مروحة لحث التيار	14 –مفرغة	10 –مولدة	6 –سخان	2 –حزام ناقل
19–كوس	15–مضخة دفع للسخان	11–مكثف	7–طنبور بخار	3–عنقة حفظ الهواء
20–ناقل	16–المؤفر	12– مضخة تدوير	8–سخانات فائقة	4–سخان أولي للهواء

الشكل 5.3

محطة توليد بالوقود الإحفوري – رسم مقطعي توضيحي. إهداء: New York State Electric & Gas Corporation

وتقوم غازات الاحتراق هذه في الحقيقة بنقل الحرارة إلى السائل العامل في أنابيب المرجل. عندما يحدث هذا النقل هناك هبوط ملحوظ في درجة الحرارة وتبلغ درجة حرارة السائل العامل بحدود 500° فهرنهايت فقط في الماء المضغوط وبحدود 950º فهرنهايت في البخار فائق التسخين.

ومن تتبع بقية أقسام الدورة المقفلة للمحطة نجد:

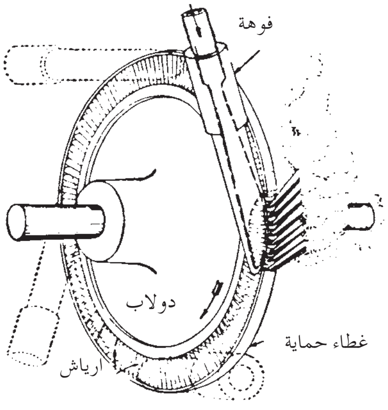
4 – أسطوانة البخار والمسخنة الفائقة للبخار تغذيان التوربين.

5 – التوربين ذاته.

6– المكثف تحت التوربين مباشرة.

7 – مضخة تغذية المرجل وهي تعيد الماء المضغوط إلى المرجل.

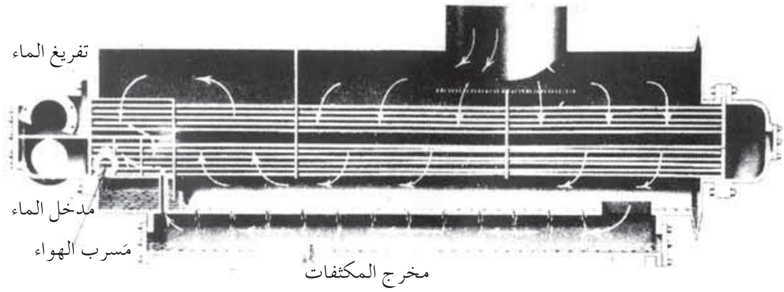
والتوربين طبعاً هو الموقع الذي تتحول فيه الطاقة الحرارية إلى عمل ميكانيكي. ويبين الشكل 6.3 نوعاً مبسطاً من التوربين يدعى توربين الزخم (Impulse Turbine) ويتألف من دولاب ذي شفرات موضوع على محور. ويندفع البخار أساساً من خلال فوهات (Nozzle) بضغطٍ عالٍ موجهاً نحو الشفرات على دولاب التوربين. ويدوّر زخم البخار المنفوث الدولاب الذي يدوّر بدوره المحور لإعطاء شغل مفيد. وفي نوع ثانٍ من التوربينات وهو التوربين الارتكاسي (Reaction Turbine) يدخل البخار خلال منافذ في شفرات ثابتة ويُدوّر مجموعة أخرى من الشفرات مع ازدياد سرعته وضغطه. ويمكن أن يكون التوربين وسطاً بين النوعين مستفيداً من عمليتي الزخم والارتكاس، أو قد يكون توربين زخم بسيطاً أو توربين ارتكاس بسيطاً اعتماداً على تصميمه.



الشكل 6.3

توربين ارتكاسي بخاري بسيط تقدمة John Wiley & Sons (1948) © Severns & Degler.

الجزء الرئيس الآخر في دورة رانكن هو المكثف (الشكل 7.3) هذا المكثف نوع مبكّر من مكثف سطحي حديث لا يلتقي فيه البخار أو المادة المكثَفة بصورة مباشرة مع ماء التبريد وما يحدث بالأحرى هو تبادل حراري فقط. ويدخل البخار في المكثف خلال الجزء العلوي ويمر على أنابيب معدنية تحمل ماء التبريد. وعند ملامسته للأنابيب الباردة يتحول البخار إلى ماء ويتجمع في الجزء السفلي في المكثف ليخرج خلال منفذ الخروج.



الشكل 7.3
مقطع طولي لمكثف سطحي صغير
المصدر: Severns & Degler © John Wiley & Sons (1948).

يصاحب تكثف البخار هبوط في الضغط مما يولد فراغاً ويقلل بذلك الضغط الخلفي في عادم التوربين (انظر الملحق أ عن دراسة دورة رانكن) وتنتقل حرارة التكثف من البخار كلها تقريباً إلى ماء التبريد الذي يدور في الأنابيب ويحملها معه.

إن الجزء الرئيس الأخير في دوره رانكن المغلقة هو مضخة تغذية المرجل التي تعيد الماء المتكثف إلى المرجل في الضغط الصحيح. هذه المضخة في أبسط مفاهيمها ترفع ضغط السائل المتكثف وحسب. ومع ذلك فإن الضغط المطلوب في المراجل الحديثة يمكن أن يكون عالياً جداً – في حدود ألف باوند على الإنش المربع.

لا يقتصر عمل المكثف على نقل الحرارة من البخار إلى ماء التبريد، بل إنه ينقل أيضاً حرارة الفضَلة إلى البيئة الخارجية. وإذا ما عدنا إلى الشكل 5.3 فسنرى عند

الأسفل ثنية أنابيب التبريد مع مضخة التدوير التي تمرر الماء خلال المكثف. وعندما يطرح ماء التبريد يمكن أن تكون حرارته عالية بدرجة ترفع معها درجة حرارة كتلة الماء الذي يصرّف إليه. وفي أوائل أيام محطات الكهرباء المجهزة بالمكثفات (أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين) لم يكن هناك إلا القليل من الاهتمام حول تصريف حرارة الفضلة.

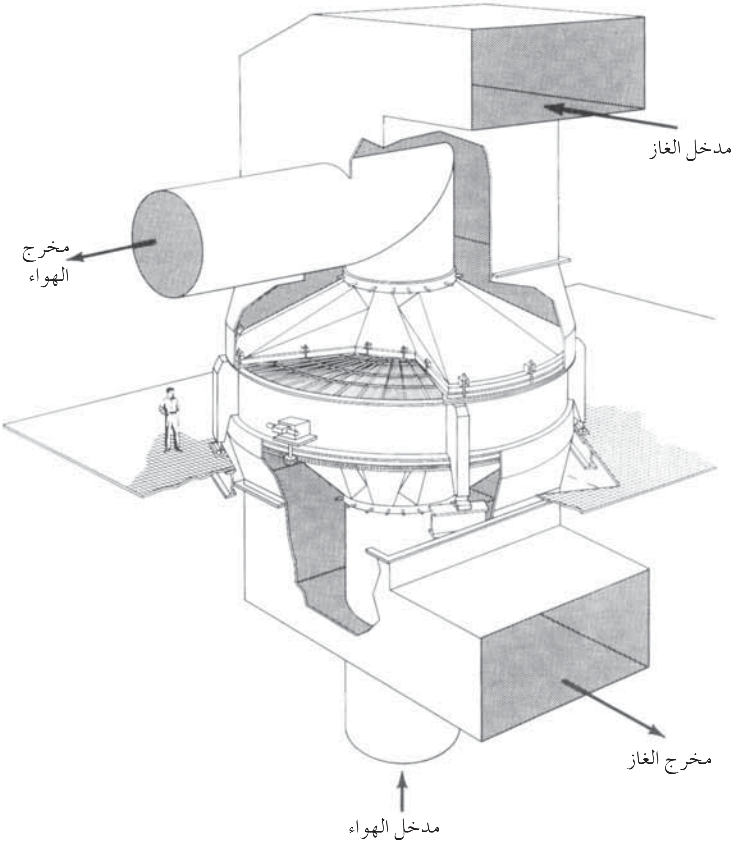
وبتطور المحطات الضخمة اكتشف البيولوجيون أن تغير درجة الحرارة يمكن أن تكون له تأثيرات ملموسة في الحياة المائية. وقد قامت الحكومات من خلال ضغوط الحركات البيئية خلال العقود القليلة الماضية بوضع ضوابط على التلوث الحراري تحدد الزيادة المسموح بها في درجات الحرارة للكتلة المائية أكان نهراً أم خليجاً أم بحيرة. وتتطلب هذه الأنظمة من شركات القدرة الكهربائية أحياناً بناء أحواض أو أبراج للتبريد للتقليل من درجات حرارة ماء التبريد الذي يجري طرحه. وفي بعض المواقع وبخاصة المجدبة منها هناك حاجة إلى أبراج تبريد بغض النظر عن الضوابط، لكي يعاد تدوير ماء التبريد إلى المكثف.

إن القاعدة التي تعمل بموجبها أحواض التبريد أو أبراج التبريد هي ذاتها، أي التبخير الجزئي وهو آلية للتبريد معروفة بصورة عامة. ففي هذه الأحواض أو الأبراج يتبخر جزء من الماء، آخذاً معه الحرارة من باقي الماء وبذلك يبرده. أما التبريد في الحوض فيتحقق نتيجة التبخر الذي يحصل عند تعريض سطح كبير من الماء في حوض ضحل إلى الهواء، وهكذا تزداد بهذه الطريقة نسبة مساحة التبريد إلى حجم كتلة الماء. ويمكن الحصول على تبريد أكفأ في البرج (انظر الشكل 8.3) حيث يسيح الماء في البرج إلى الأسفل من رشاشات أو صفائح عبر حواجز مانعة خلال تيار من الهواء الصاعد. ويمكن لهذا التيار أن يكون تيار حمل طبيعي أو أن يكون قسرياً بواسطة مراوح.

هناك مكوّن واحد أخير من محطة الكهرباء الحرارية يستحق الذكر – وهو مسخن الهواء الأولي. هدف المسخن الأولي هو تحسين كفاءة المحطة من خلال استرداد بعض الحرارة التي تهدر بإرسالها خلال المدخنة بعد عملية الاحتراق. ويجري هذا الاسترداد الجزئي من خلال تبادل حراري بين غازات المدخنة الساخنة والهواء



الشكل 8.3
برج تبريد مصنع لتوليد الكهرباء. تقدمة:
Alabama Power, Birmingham, AL.



الشكل 9.3
عملية إدخال الهواء قبل تسخينة في مصنع لتوليد الطاقة
تقدمة: Rothmuhle regenerative air Preheater, Courtesy of Babcock & Wilcox Co.

المسحوب داخلاً (لا يوجد أي تماس مباشر بين تياري الهواء). ويبين الشكل 9.3 المعدات الفعلية المستخدمة في محطة قدرة كبيرة وتسخين الهواء الأولي لا يعتبر جزءاً من دورة رانكن المغلقة، لذا ينبغي عدم التفكير فيه كتحسين لكفاءة دورة رانكن كما هي الحالة – مع إعادة تسخين الماء. ومع ذلك، فإن التسخين الأولي للهواء يلغي جزءاً من الحرارة المطلوبة في الاحتراق. وهذا يعني أن وقوداً أقل يمكن أن يزود الحرارة نفسها لمادة العمل.

التوليد الكهرومائي

رغم أننا سنركز معظم انتباهنا على المحركات الحرارية، لكن علينا أن لا نغفل قوة الماء. إن تحويل قوة الماء الساقط أو الجاري إلى عمل مفيد نوع قديم من التكنولوجيا. كانت دواليب الماء قبل تطوير المحركات البخارية تستخدم كمحركات خلال مرحلة التصنيع الأولي في أوروبا. وكان توافر الماء في الولايات المتحدة العامل الحاسم في تحديد موقع المصانع الأولى مثل مصانع النسيج في نيو إنجلند.

ورغم أن القوة الكهرومائية نمت بأرقام لا شك فيها خلال القرن التاسع عشر إلا أن الطلب الكبير جداً على القوة الميكانيكية التي جلبتها الثورة الصناعية كان يتجاوز كثيراً قدرات مواقع القوة الكهرومائية الصغيرة في الشمال الشرقي (للولايات المتحدة). لذا استخدم الفحم مع المحركات البخارية لتزويد الطاقة في البدء. وخلال القرن لاحقاً جهزت المحطات الكهربائية التي تسير بالفحم والكهرباء التي تنتجها نسبة متزايدة من عبء الطاقة. ونما التوليد الكهربائي بسرعة (بقي الاستخدام يتضاعف كل عقد ولأكثر من خمسة عقود) خلال القرن العشرين وزود معظم الطاقة التي احتاج إليها الصناعة إضافة إلى قدر كبير من الطاقة التي كانت تستخدم للأغراض البيتية والتجارية.

احتاج توليد الكهرباء في أغلبيته إلى محطات من النوع الحراري. وتولد المحطات الحرارية (التي تستخدم الوقود الأحفوري أو النووية) اليوم أربعة أخماس الطاقة الكهربائية. ومع ذلك فإن الـ 20 في المئة الباقية تولد بقوة الماء. ومعظم التطوير الذي حصل للطاقة الكهرومائية في الولايات المتحدة استغل مواقع ذات إمكانات قدرة هائلة مثل نهر نياغارا أو سد هوفر، أو أنه كان جزءاً من خطة تطوير إقليمية كبيرة

مثل وادي تينيسي أو مصبات مياه الشمال الغربي. وخلال التوسع في استخدام القوة الكهربائية في أوائل هذا القرن تجاهل تطوير العديد من مواقع الماء الصغيرة لتطوير الطاقة الكهرومائية، وفي كثير من الحالات أقفلت محطات التوليد المائية الصغيرة لمصلحة المحطات الأكبر التي تستخدم الوقود الأحفوري.

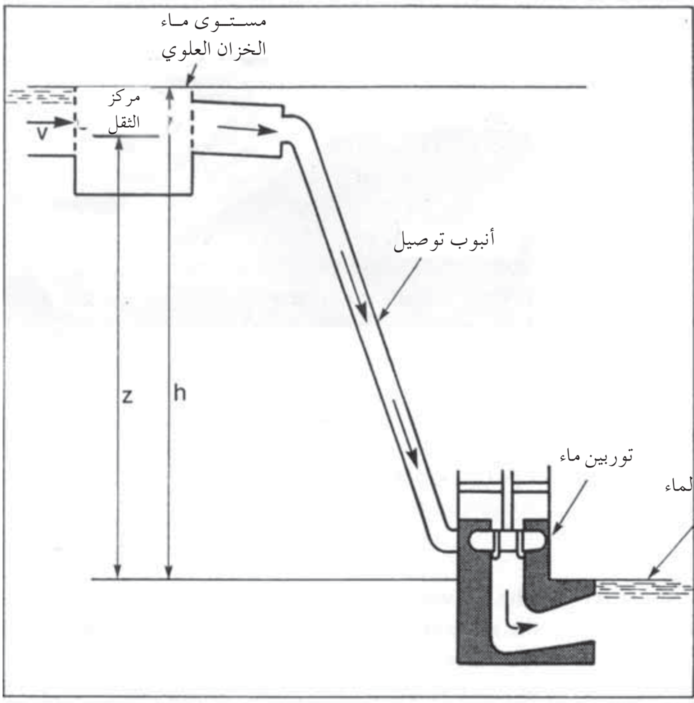
والواقع أن هذه المواقع الصغيرة إذا ما جمعت سوية يمكنها توفير كمية كبيرة من الطاقة. وتبقى هذه الإمكانية كما يبين الشكل 13.2 غير مستغلة. ويبلغ المستخدم من طاقة التوليد المائي في بعض المناطق أقل من نصف المتوافر. ومقياس هذه الأعمدة البيانية مهم. فكل وحدة تمثل 103 ميغاواط (M.W) من القدرة الكهربائية وهو ما يعادل تقريباً منتوج محطة توليد حرارية كبيرة حديثة. بكلمة أخرى، إن التطوير الكامل للقوة الكهرومائية في الولايات المتحدة يمكن أن يحل محل عشرات من محطات الطاقة النووية أو العاملة بالفحم. والموقف ذاته قائم في أجزاء أخرى من العالم وبخاصة في الدول الأقل نمواً (انظر الفصل الخامس).

كانت الحكمة المتفق عليها في صناعة الطاقة الكهربائية قبل أزمة الطاقة في السبعينيات تقول إن القوة الكهرومائية في الولايات المتحدة مطورة بصورة كاملة. وما عُني بذلك هو أن المواقع الكهرومائية الكبرى قد جرى تطويرها. ومع ذلك فإن حلول عصر الوقود غالي الثمن وارتفاع أسعار بناء المحطات النووية السريع والخلافات حول النتائج البيئية المترتبة على المحطات العاملة بالفحم وبالقوة النووية، أعاد مواقع القوة المائية الصغرى لينظر إليها نظرة مختلفة تماماً وبوشر بالعمل في عدد قليل من المشاريع المائية لكن ما زال هنالك مجال كبير لتطويرات أكثر.

أساسيات القوة الكهرومائية

يعتمد توليد الطاقة الكهرومائية على قاعدة الطاقة الكامنة. فالعمليات الطبيعية من تبخر ومطر تضع كميات من الماء على ارتفاعات متفاوتة. ويمكن لبعض هذه الكميات من الماء على ارتفاعات تتجاوز حداً معيناً أن توفِّر طاقة لعمل مفيد. وعندما يسقط الماء من الارتفاع العالي تتحول الطاقة الكامنة للماء إلى طاقة حركية (انظر الملحق أ حول أنواع الطاقة). يجري بعد ذلك تحويل هذه الطاقة الحركية إلى طاقة ميكانيكية من خلال توربين مائي. وقد يحدث التحول إلى قوة حركية تدريجياً عبر

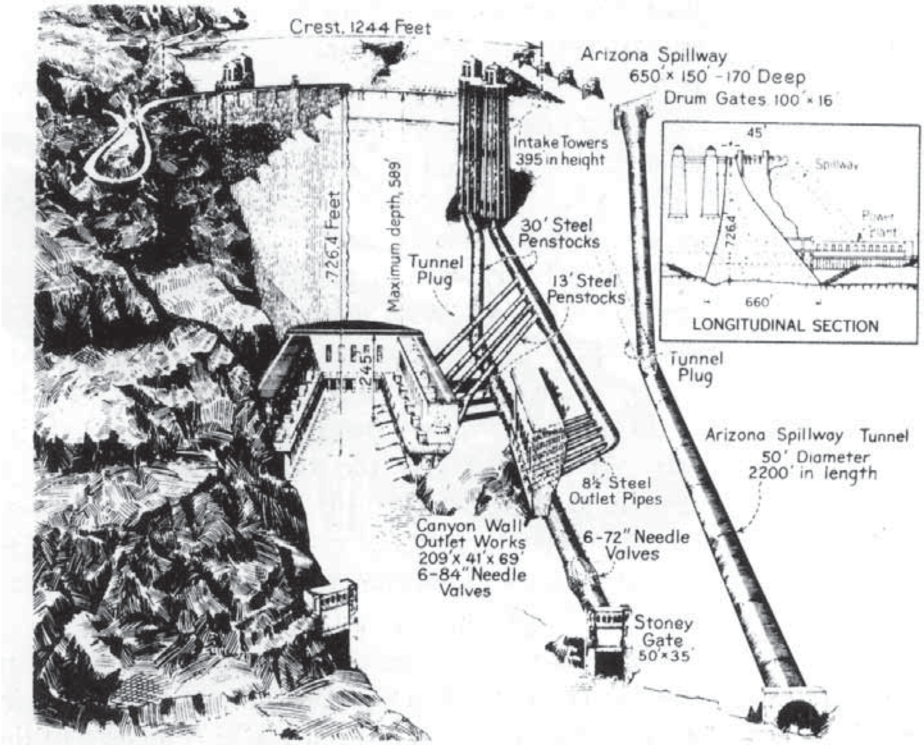
انحدار تدريجي أو عبر سقوط مفاجئ لكن القاعدة العامة هي ذاتها. ويصور الشكل 10.3 هذه القاعدة.



الشكل 10.3

مبدأ عمل المصنع الكهرومائي تقدمة: Davis & Sosen Son (1969)

تصنف الوسائل الكهرومائية بحسب الارتفاع الذي تعمل معه، أي الارتفاع الرأسي الذي يسقط منه الماء قبل أن يؤدي عمله. ويُعتبر السقوط من ارتفاع رأسي في مدى 500 قدم أو أكثر محطة عالية الارتفاع. أما التي تعمل بسقوط يقل عن 65 قدماً فتدعى محطة واطئة الارتفاع وما بين هذين الارتفاعين تدعى بالمحطة متوسطة الارتفاع. والمثال الواضح لمحطة ذات ارتفاع رأسي عالٍ هو سد هوفر على نهر كولورادو في نيفادا (الشكل 11.3).



الشكل 11.3 سد هوفر ـ مصنع كهرومائي ملحق

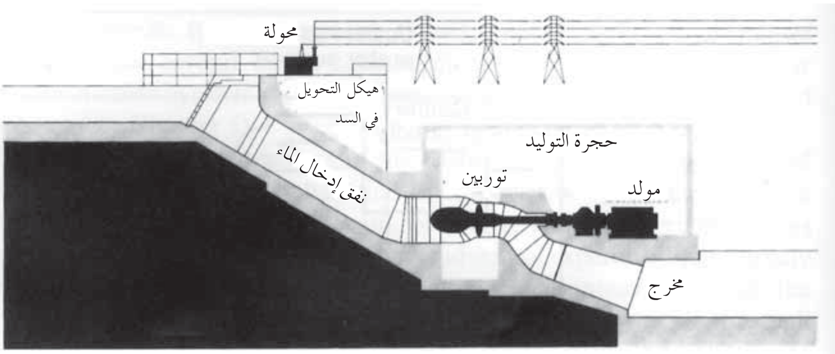
المصدر: US Department of Interior (1972)

والمحطات الكهرومائية مثل بقية محطات التوليد تصنف أيضاً بحسب حجم إنتاجها من القدرة الكهربائية. فسد هوفر هو محطة ذات حجم كبير، كما إنه سد ذو مسقط رأسي عالٍ تبلغ سعته التوليدية 1344 ميغاواط. أما مركّب خليج جيمس الهائل في كيبيك بكندا فسيكون منتوجه عند اكتماله حوالى 25000 ميغاواط.

لا يتحقق الحصول على المنتوج بمقياس كبير باستخدام مساقط عالية وحدها، بل إن الطاقة الإنتاجية الكبيرة هي ناتج ارتفاع المسقط الرأسي (ارتفاع الخزان مقاساً بالأقدام) ونسبة المياه المتدفقة (غالون في الثانية). وتبعاً لذلك يمكن الحصول على منتوج بمقياس كبير من محطة تعتمد مسقطاً رأسياً صغيراً لكن فيها تدفقاً مائياً كبيراً. ومن أمثلة ذلك المحطة المائية في روبرت موسى على نهر سانت لورانس التي تمتلك سعة توليدية تبلغ 800 ميغاواط، ومسقط ماء ارتفاعه 30 قدماً فقط.

وتعمل محطات التوليد الكهرومائية الصغيرة اعتيادياً في مدى يتراوح بين بضعة

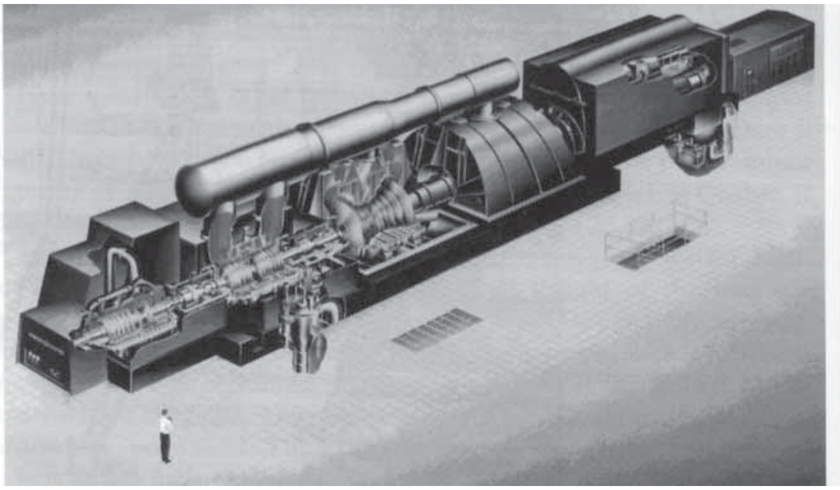
كيلوواط إلى 5 ميغاواط. ولدى معظم المحطات المائية الصغيرة مسقط رأسي واطئ مثل السد المُبيّن في الشكل 12.3. ويوفر تدفق النهر، وكذلك ضغط المسقط المائي وراء السد، الطاقة. ويسمى المنتوج المستحصل من الحجم الاعتيادي للتدفق (دفْق النهر (Run of the River)). وتعمل المحطة المائية في الشكل 12.3 أساساً على حجم دفق النهر من دون مسقط رأسي فعلياً.



الشكل 12.3 مخطط محطة توليد كهرومائي.
تقدمة: City of Seattle. Light Dept.

التحويل إلى كهرباء

يستند كلٌ من تحويل القوة الكهرومائية وقوة البخار لكهرباء إلى المفهوم نفسه. فالطاقة سواء كانت بشكل ماء ساقط أم بخار تدوّر توربيناً يدوّر بدوره مولداً كهربائياً. ولما كانت غالبية الكهرباء تولد في محطات حرارية، سنركز على تحويل الطاقة الحرارية إلى كهرباء. ولغرض توليد الكهرباء في محطة قدرة كهربائية يربط التوربين إلى مولد كهربائي من خلال محور دوران مشترك (الشكل 13.3). والتوربين هو المحرك الأولي، ما يعني أنه يزود الشغل الميكانيكي لتدوير المحور (في حالة التوليد الكهرومائي يقوم التوربين المائي بإداء المهمة نفسها).



الشكل 13.3 مولد توربيني بخاري كبير
تقدمة: General Electric Company

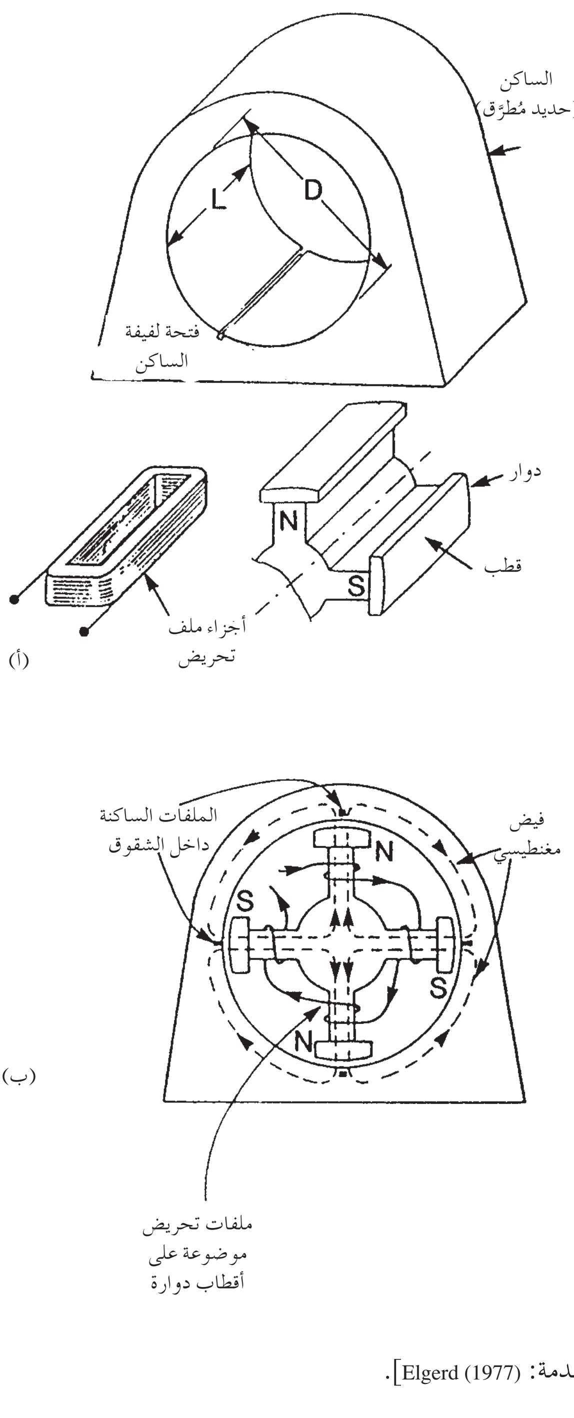
ويجري توليد الكهرباء تبعاً لقواعد الحث الكهرومغنطيسي حيث يجري حث فولتية كهربائية في ملف سلكي بواسطة مجال مغنطيسي دوار (انظر الملحق أ). ويمكن توليد نوعين من الكهرباء. تيار مباشر (Direct Current) (D.C) أو تيار متناوب (Alternating Current) (A.C). ولمّا كانت كل القدرة الكهربائية المولدة مركزياً من النوع المتناوب فسنقوم بالتركيز على مولد التيار المناوب التقليدي كما يصوره الشكل 14.3.

يمتلك مولد التيار المتناوب أساساً جزءين: الجزء الساكن والجزء الدوار. والجزء الساكن (الشكل 14.3 أ) هو هيكل ثابت يقوم بالإمساك بملفات سلكية يجري حث الفولتية فيها. ويتألف هذا الهيكل من صفائح من الصلب تقوم بتحديد مسار الفيض المغنطيسي داخل الماكنة. ويقوم الصلب بتركيز وتوجيه الفيض المغنطيسي لأقطاب الجزء الدوار كلما تنتقل من أمام أحد ملفات الجزء الساكن إلى أمام الملف التالي عند الحد الخارجي للدوران. إن الغرض من الصفائح هو التقليل من التيارات الدوامة المحتثة بواسطة المغنطيس والتي تسبب خسائر كهربائية (انظر Tarboux, 1946).

أما الجزء الدوار (الشكل 14.3ب) الذي يسيّره التوربين فيحوي مغانيط كهربائية.

وهـنـاك فـي نـهـايـات الـدوار أقـطـاب مغنـطيسية تجري مغـنـطـتـهـا بـواسـطـة مـلـفـات الـمـجـال تـوضـع داخـل قـطـر أوجـه الأقطاب. وهـذا المثال بالذات هو ماكينة ذات أربعة أقـطـاب أوجـدت مـلـفـات الـمـجـال عـلـى الـدوار (يـبـيـنـهـا الشكل 14.3ب بشـكـل لـفـة واحـدة) فـيـهـا زوجـان مـن الأقطاب (الشمال ـ الجنوب) أو (N-S). وتـتـلـقـى مـلـفـات الـمـجـال تـيـاراً كـهـربـائـيـاً من مـصـدر مـنـفـصـل. تـيـار مـبـاشـر (D.C) يمكن في الواقع إنتاجه بـواسـطـة مـولـد لـلـتـيـار الـمـبـاشـر عـلـى مـحـور الـدوران نـفـسـه كـمـولـد الـتـيـار الـمـتـنـاوب الـرئـيس.

وعـنـدمـا تـدور الأقـطـاب المغنطيسية على الدوار عبر الـمـلـفـات الـمـغـروسـة في الجزء الـسـاكـن، تتناوب فولتية التيار الـمـتـنـاوب فـي قـطـبـيـتـهـا بـيـن



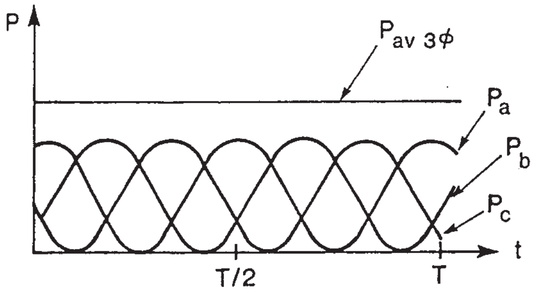
الشكل 14.3 مولد تيار متناوب

(أ) الأجزاء مفككة

(ب) ماكينة رباعية الأقطاب مجمّعة [تقدمة: Elgerd (1977)].

الموجب والسالب. ويسلك تحول سلس للقطبية شكل موجة جيبية (Sine Waveshape) عبر الزمن (انظر الملحق أ) مع نسبة تكرار تردد تبلغ ستين مرة في الثانية (60 هرتز)[2]. وإذا ما سرى التيار من ملفات الجزء الساكن فسيكون له أيضاً شكل موجي سلس مع نسبة تكرار تبلغ 60 هرتز. وتقرر هاتان الموجتان معاً القدرة المنتجة لأن منتج المولد عند أي لحظة يساوي حاصل ضرب الفولتية بالتيار (ووحدة قياسه هي الواط، انظر الملحق أ).

وستكون القوة المنتجة أيضاً متذبذبة مثل منحنى موجة جيبية ويمثل المعدل لقدرة المولد المنتجة عبر الزمن الطاقة المفيدة التي يعطيها المولد. أي إنها الطاقة التي يمكن إعادة تحويلها إلى شغل ميكانيكي من قبل محرك، أو يمكن تحويلها لترجع بشكل حرارة للعملاء الذين يرتبطون بشبكة الكهرباء.



الشكل 15.3: **أشكال موجة قدرة ثلاثية الطور مقابل الزمن**

لكننا إذا نظرنا إلى أشكال موجات الفولتية والتيار المتناوب هذه سنتمكن أن نخمن أنّ القدرة ستتباين عبر الزمن أيضاً. ولتجنب تموّج مصدر القوة تعمل الأنظمة الكهربائية على أسس الأطوار الثلاثة (Three Phase Basis) ما ينتج منه ثلاثة أشكال موجية متميزة (Pa, Pb and Pc) كل واحدة منها منفصلة بفترات زمنية متساوية عن الأخرى، كما يبين ذلك الشكل 15.3[3]. وتطبق هذه الفولتيات على دوائر كهربائية ذات

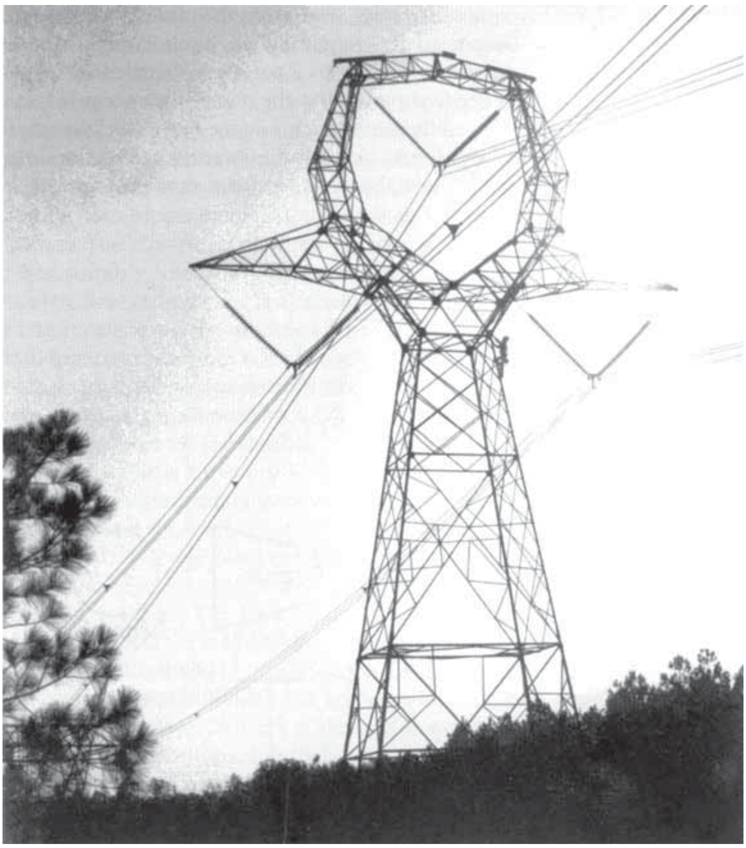
---

2 الهرتز (Hertz 'Hz') هي وحدة للتواتر أو التردد أو عدد مرات التكرار كل ثانية. وتردد الفولتية في التيار المتناوب في الولايات المتحدة هي 60 هرتز بينماً تبلغ في كافة الأقطار الأخرى 50 هرتز.

3 يبيّن الشكل 3.61، التغييرات الزمنية لخرج القدرة (P_a وP_b وP_c) لكل من المراحل الثلاث نسبة إلى دورة التكرار الأساس (T) للفولتيات وَالتيارات. أمّا Pav2ø فهي مجموع القدرات الثلاث (P_a وP_b وP_c) لكل لحظة، وَتكون ثابتة بمرور الوقت.

ثلاثة موصلات (إضافة إلى إمكانية وجود اتصال أرضي). والتشغيل باعتماد الأطوار الثلاثة يجعل مجموع القوة المنتجة للأطوار الثلاثة ثابتاً وغير متموج (الشكل 15.3). والمنتوج الكهربائي الثابت ذو فائدة كبرى لأنظمة التيار المتردد متعددة الأطوار.

بعد توليد القدرة ثلاثية الأطوار ترفع الفولتية لغرض النقل. وتقوم المحولات الكهربائية بتحويل الفولتية الواطئة إلى فولتية عالية، ثم تخفضها ثانية عند نقطة الاستخدام (انظر الملحق أ للبحث في تحويل القوة الكهربائية). والفولتيات العالية هي أفضل الطرق لنقل الكهرباء إلى مسافات طويلة لأنها تقلل الخسائر في خطوط نقل القوة. إذ يمكن تقليص الخسائر إلى الحد الأدنى باللجوء إلى النقل بتوتر عالٍ (انظر الشكل 16.3).



الشكل 16.3
خط نقل تيار عالي التوتر تقدمة: Carolina Power & Light Company

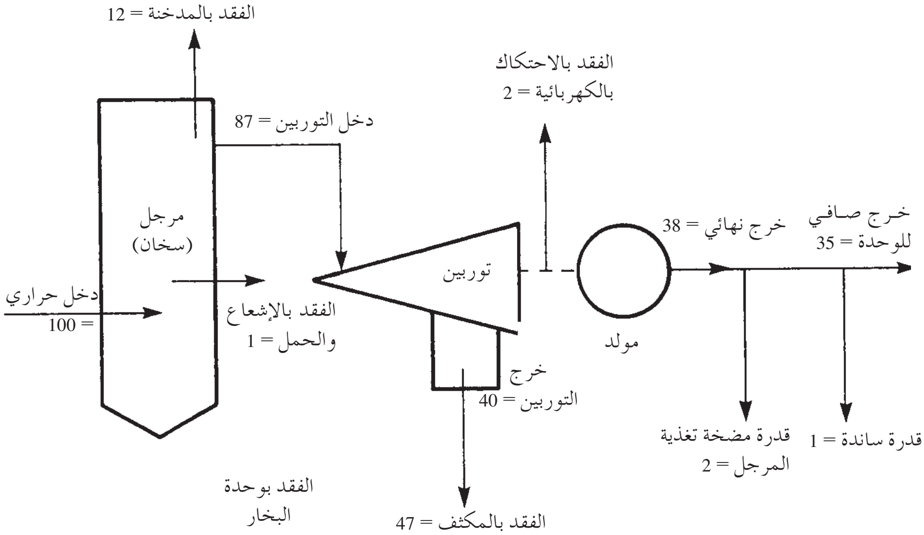
يتذبذب الطلب على القوة الكهربائية في دورات يومية صاعداً إلى ذروات عندما يكون الناس نشيطون خلال النهار ومنخفضاً إلى الحد الأدنى خلال الليل. لذا فإن محطات القوة الكهربائية مصممة لطورين من طرق التشغيل – للحمل الأساس ولحمل الذروة. وتقوم خدمة الحمل الأساس بتزويد المستوى الأدنى من القوة المطلوبة والتي تستمر ليل نهار.

أما خدمة حمل الذروة فتساعد على تزويد القدرة القصوى المطلوبة خلال الفترة القصيرة من النهار عندما يبرز الطلب عليها. ويطلب من خدمة تجهيز الكهرباء تزويد القدرة بأي مستوى مطلوب وبأقل كلفة ممكنة.

لذا فإن حمل الذروة يزوّد بشكل أفضل من مولدات ذات كلفة رأسمالية منخفضة نسبياً وكلَف تشغيلية مرتفعة (مثل التوربينات الغازية التي سنصفها لاحقاً في هذا الفصل). وتعوض الكلف الاستثمارية منخفضة نسبياً عن كلف التشغيل الكبيرة لا سيما أن المشغل لا يتكبد هذه الكلف إلا لمدد قليلة فقط.

كفاءة محطات توليد القدرة الكهربائية البخارية

لا تستغل محطة قدرة بخارية عادية كما أشرنا (يبينها الشكل 17.3 تخطيطاً) جميع أو



الشكل 17.3 محطة قدرة بخارية: طاقات المدخل/ المخرج

مقتبسة من: W. D. Marsh,
Economics of Electric Utility Power Generation,
New York: Clarendon Press; Oxford University Press, 1980.

ما يقارب جميع مدخولها من الطاقة. فالمنتوج المفيد المردود في الشكل ـ الكهرباء ـ لا يشكل إلا 35 وحدة طاقة في حين أن المدخول يساوي 100 وحدة طاقة، لذا فإن كفاءة المحطة (نسبة الطاقة المفيدة إلى طاقة الوقود المطلوبة للتغذية) هي 35 في المئة فقط. هناك حاجة لمقدار قليل من القوة (بحدود 2 في المئة) لتشغيل المحطة مثل مضخة تغذية المرجل لكن بقية الطاقة تفقد كحرارة فضلة – جزء منها في كل خطوة على الطريق. والركام المفقود في المدخنة مثلاً يبلغ 12 وحدة بينما يأخذ إشعاع المرجل (سخان) وتيارات الحمل ما مقداره وحدة واحدة. غير أن أكبر فقد على أي حال هو من حرارة فضلة المكثف وتبلغ 47 وحدة وهي أكثر من الطاقة المزودة كمنتوج.

ورغم ذلك فنحن نعرف من الثيرموديناميكا أن معظم هذه الخسارة لا يمكن تجنبها (انظر الملحق أ). إن هذه الكفاءة البالغة 35 في المئة تمثل الجيل الحالي الاعتيادي من محطات القدرة البخارية. وقد تحسن هذه الكفاءة حتى حدود 40 في المئة من خلال الحفاظ على الطاقة وتحسينات الكفاءة التقنية مثل إعادة التوليد أو إعادة التسخين أو التسخين المسبق (انظر الفصل 4 لما تتضمنه الكفاءة التقنية لتكنولوجيات الطاقة بصورة عامة من الناحية الاقتصادية ومن حيث منهاج العمل). ويبدو أن بالإمكان استحصال تحسينات إضافية لرفع الكفاءة بالتكنولوجيات قيد التطوير. ويبحث الملحق ج بعضاً من هذه التكنولوجيات مثل التوليد بواسطة الدورة المدمجة أو التوليد المزدوج أو الديناميك المائعي المغنطيسي (MHD). وهذه التكنولوجيات الجديدة قد تمتلك إمكانية رفع الكفاءة إلى 50 في المئة على الأقل. لكن المحطات العاملة بقوة البخار من النوع التقليدي تعمل اليوم قرب الحدود العملية لكفاءة التحويل.

الاحتراق الداخلي

تستخدم معظم وسائل النقل الحديثة تكنولوجيات محركات حرارية تختلف عن تلك المستخدمة في التوليد الكهربائي. فالسيارات والشاحنات والطائرات تستخدم أنواعاً مختلفة من محركات الاحتراق الداخلي. هناك نوعان رئيسان لمحركات السيارات والشاحنات وهما محرك البنزين الذي يعمل على دورة أوتو[4] ومحرك

4 سميت هذه الدورات الثيرموديناميكية بأسماء نيكولاوس أوتو (Nikolaus A. Otto) وهو مهندس ألماني (1832 – 1891) ورودولف ديزل (Rudolf Diesel) وهو مهندس ألماني (1858 – 1913) على التوالي.

الديزل الذي يحرق نوعية أدنى من نفط مقطر ويعمل على دورة ديزل. في حين تستخدم المحركات العاملة بموجب دورة أوتو بصورة حصرية لتوفير القوة للسيارات والشاحنات، وتستخدم محركات الديزل لتشغيل وسائل التوليد الصغيرة وفي معظم قاطرات السكك الحديدية في يومنا هذا*.

وتستخدم الطائرات النفاثة نوعاً ثالثاً من مكائن الاحتراق الداخلي وهي توربين الاحتراق أو التوربين الغازي. وتستخدم التوربينات الغازية أيضاً كمحركات أولية للمولدات الكهربائية في استخدامات خاصة ومهمة. وأفضل هذه الاستخدامات بالذكر هي توفير القدرة الإضافية خلال أوقات النهار عندما يصل الطلب على الكهرباء إلى حمل الذروة. ويتمتع التوربين الغازي بفوائد خاصة. فهو **أولاً** يمكن أن يبدأ العمل بسرعة (فالمرجل يحتاج إلى زمن طويل لرفع ضغط البخار بينما لا يحتاج التوربين الغازي لذلك). **ثانياً**: رغم أنه يحرق أنواعاً غالية الثمن من الوقود مثل مقطرات النفط أو الغاز الطبيعي، إلا أن كلفة المعدات التوربينية ذاتها أقل بكثير من الاستثمار المطلوب للتوربين البخاري أو لسد محطة كهرومائية. فالتوربين الغازي لكونه يستخدم لفترات قصيرة خلال السنة لا يحتاج إلا القليل من الوقود بصورة إجمالية وهو بذلك أكثر فاعلية من حيث الكلفة عندما يجري أخذ كلف كل من رأس المال والتشغيل بنظر الاعتبار مقارنةً بمعظم البدائل الأخرى لخدمة حمل الذروة.

إن اصطلاح احتراق داخلي يشير إلى حقيقة أن الوقود يحرق داخل المحرك. أما في التحويل بواسطة الدورة البخارية فالوقود يحرق خارجياً في فرن المرجل. وعند ذلك تحول حرارة الاحتراق في مادة التشغيل وتقوم مادة التشغيل بأداء العمل لمخرج مفيد. أما في محركات الاحتراق الداخلي فإن الاحتراق يحدث داخل الماكينة العاملة وتعمل غازات الاحتراق الساخنة عمل مادة التشغيل منتجة عملاً مفيداً. وتختلف تكنولوجيا الاحتراق الداخلي أيضاً عن عمليات دورة البخار الحديثة في أنها دورة مفتوحة ثيرموديناميكياً. ففي محركات البنزين والديزل والتوربينات الغازية ترسل غازات الاحتراق إلى العادم بعد أن تؤدي العمل المطلوب منها.

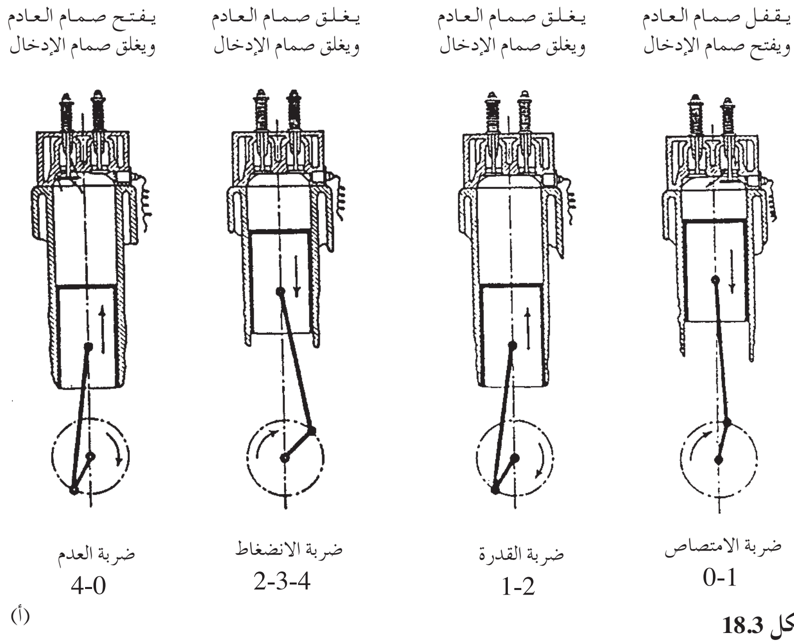
---

* بدأت محركات الديزل تغزو سوق السيارات الصغيرة بصورة كبيرة وتسيطر الآن على أكثر من نصفها في أوروبا والهند لكنها غير مستخدمة في أميركا. كذلك فإن الديزلات الثقيلة تستخدم كمحركات لنسبة كبيرة جداً من السفن البحرية. يجري إعداد مزيج الهواء والبنزين بواسطة المكربن (Judge, 1972).

[ملاحظة: لا تستخدم المحركات الحديثة هذه التقنية الآن وتمت الاستعاضة عنها بتقنية حقن الوقود الذي يحدد حاسوب كمّيته لكل أسطوانة ويجري امتصاص الهواء مباشرة ليجري الامتزاج مع الوقود داخل المكبس] (المترجم).

دورة أوتو ودورة الديزل

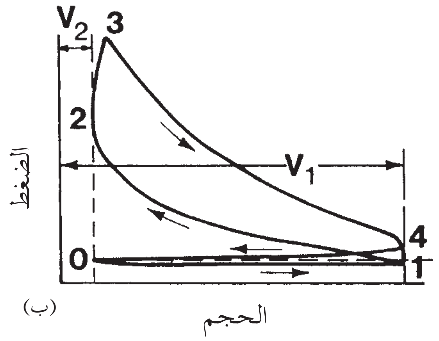
تعمل كافة محركات البنزين والديزل تقريباً بواسطة منظومة مكابس ودورة ثيرموديناميكية تتبع مسالك شبيهة بتلك التي تمثل المحرك البخاري المفتوح. وتتبع دورة أوتو لمحركات البنزين التقليدية المسالك الثيرموديناميكية المبينة في الشكل 18.3.



الشكل 18.3

(أ) محرك الاحتراق الداخلي بدورة أوتو

دورة التشغيل لمحرك رباعي الضربات يعمل بدورة أوتو



(ب) مخطط قياس الضغط - الحجم (p-V) لمحرك رباعي الضربات يعمل بدورة أوتو.

مقتبس من: Severns and Degler (1948) .

وتحتاج الدورة إلى أربع ضربات (حركات باتجاه واحد). وإحدى هذه الضربات ليست على وجه الثقة مسلكاً في الدورة الثيرموديناميكية، بل بالأحرى ضربة امتصاص الوقود (1-0). كذلك فإن إحدى الضربات الميكانيكية تدمج عمليتين ثيرموديناميكيتين. لذا فإن الدورة الثيرموديناميكية تتألف من المسار 1– 2 – 3– 4 كما هو مؤشر في الرسم البياني p-V.

والضربات الأربع لدورة أوتو هي:

الضربة 0–1 خلال ضربة الامتصاص سحب مزيج[5] الوقود في الأسطوانة خلال صمام إدخال مفتوح عندما يتحرك المكبس إلى أسفل.

الضربة 1–2 خلال ضربة الانضغاط يضغط مزيج الوقود في وقت يتحرك فيه المكبس إلى الأعلى فيغلق كلا الصمامين. هذه الضربة وهي مسلك في الدورة الثيرموديناميكية مثالية في عملية انضغاط أيزونتروبية (انظر الملحق أ).

الضربة 2–3–4 ضربة القدرة، تتألف من جزءين من المسلك الثيرموديناميكي (2 – 3) و(3–4). والجزء الأول أي (2–3) هو عملية تزويد الحرارة حيث يجري اتقاد مزيج الوقود بواسطة شرارة عند النقطة 2. أما المسلك (2– 3) فهو تقريباً عملية حجم ثابت، إذ ترفع عملية الإحتراق الضغط في حين يبدأ المكبس حركته من موضع الحجم الأدنى. وتزود عملية التمدد عبر المسلك 3– 4 شغلاً إلى محور المحرك القلاب. وتبدأ هذه العملية عند وصول الضغط حده الأقصى (عند النقطة 3).

الضربة 4–0 خلال ضربة التفريغ يصار إلى نبذ الحرارة وهو ما يماثل ضربة نبذ الحرارة في المحرك البخاري. فمثلما يقوم المحرك البخاري بنفث البخار في هذه الضربة، فإن محرك البنزين ينفث نواتج الاحتراق (غازات) من الأسطوانة خلال صمام التفريغ.

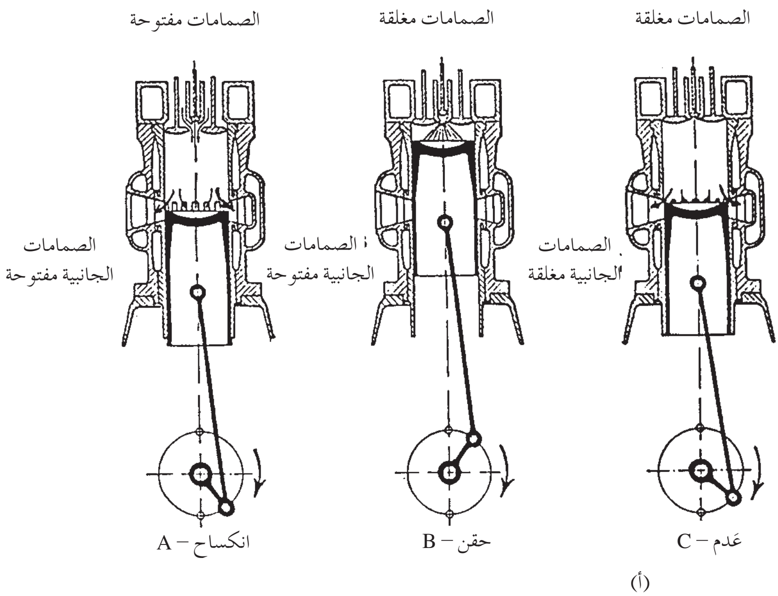
وفي حين تستخدم محركات دورة أوتو القدح الكهربائي لبدء الاحتراق في

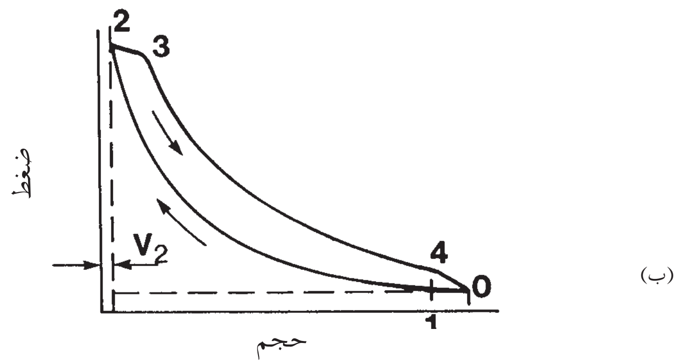
5 يجري إعداد مزيج الهواء والبنزين بواسطة المكربن (Judge, .1972)

ملاحظة: لا تستخدم المحركات الحديثة هذه التقنية الآن وتمت الاستعاضة عنها بتقنية حقن الوقود الذي يحدد حاسوب كمّيته لكل أسطوانة ويجري امتصاص الهواء مباشرة ليجري الامتزاج مع الوقود داخل المكبس (المترجم).

الأسطوانات لا تقوم محركات الديزل بذلك. ويحصل الاحتراق في محرك الديزل عندما ترفع ضربة الانضغاط مزيج الوقود إلى درجة حرارية عالية بحيث تكفي لكي يحدث الاتقاد الذاتي (اتقاد السيارة). ويختلف محرك الديزل عن دورة أوتو في كون مسلك التزويد بالحرارة هو عملية ضغط ثابت بدلاً من كونها عملية حجم ثابت.

ودورة الديزل (الشكل 19.3) هي لماكينة ذات دورتين، ما يعني أن الدورة





الشكل 19.3 دورة الديزل لمحرك احتراق داخلي
(أ) دورة العمل لمحرك ديزل ذي دورتين
(ب) مخطط قياس الضغط – الحجم لدورة ديزل في محرك ذي دورتين
مقتبسة من: .Severns and Degler (1948)

الثيرموديناميكية بأجملها تكتمل بضربتين بحركة المكبس إلى أعلى وإلى أسفل. (ويمكن أن يكون عمل الديزل بضربات رباعية أيضاً). وفي عملية الضربتين أربع عمليات ثيرموديناميكية.

الضربة 0– 1– 2

المسلك 0–1 مع انفتاح الصمامات العلوية يدفع الهواء المضغوط نواتج الاحتراق لدورة الشغل السابقة من صمامات العادم المفتوحة على الجانب، وتدعى هذه بعملية الكسح.

المسلك 1–2 خلال عملية الانضغاط وهي عملية أيزنتروبية مثالية، تصل درجة حرارة الاتقاد في النقطة 2. وتكون كل الصمامات مقفلة.

الضربة 2–3–4–0

المسلك 2–3 يحدث هنا حقن الحرارة، وهذه عملية ثيرموديناميكية مثالية بضغط ثابت (الموقع ب في الشكل 19.3 (أ)) مع إقفال كافة الصمامات.

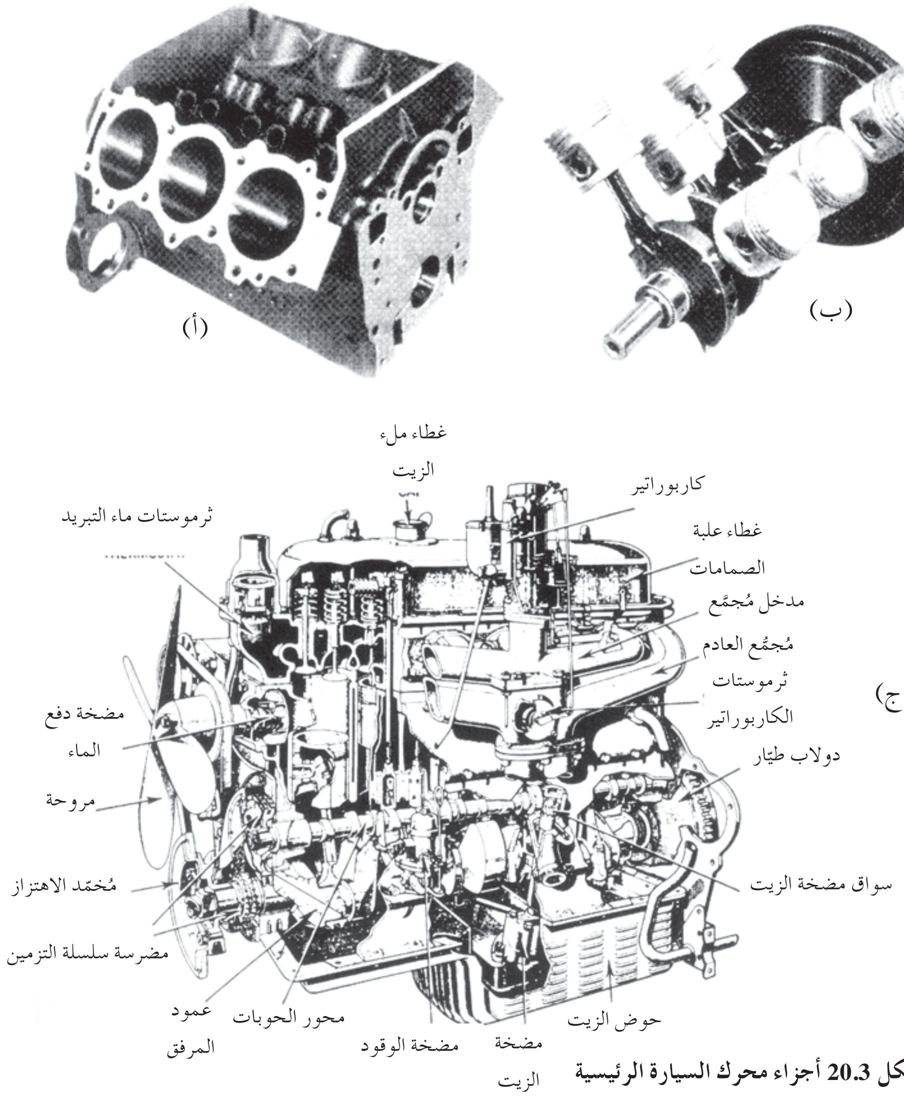
المسلك 3–4 عملية التمدد حيث يجري تسليم الشغل وكل الصمامات مقفلة.

المسلك 4–0 خلال عملية التفريغ تفتح الصمامات الجانبية عند نهاية دورة التمدد ويتم نبذ الحرارة.

ويبين الشكل (20.3) الأجزاء الرئيسة لمحرك سيارة. ورغم أن المحرك في الشكل هو محرك يعمل بالبنزين إلا أن الكثير من الأجزاء شبيهة بمحرك الديزل. أما الشكل (20.3 أ) فهو صورة فوتوغرافية لكتلة المحرك تظهر فيها الأسطوانات التي تتحرك المكابس داخلها. أما الشكل (20.3 ب) فهو صورة للمكابس ذاتها. وأخيراً فإن الشكل (20.3 ج) يمثل رسماً لمجمعة المحرك تبدو فيها الأجزاء الرئيسة لمحرك يعمل بالبنزين وهي معلّمة.

وتمتلك دورة الديزل بضع ميزات على دورة أوتو. **أولها** أنها لا تحتاج إلى منظومة قدح كهربائية منفصلة أو إلى مكربن مثلما هو الحال مع محرك البنزين (دورة أوتو) (انظر الشكل 20.3). الأمر **الثاني**: بالإمكان تشغيل دورة الديزل بدرجات حرارية وضغوط تعطي كفاءات حرارية مثالية أعلى مقارنة بدورة أوتو. **وأخيراً** لأن وقود

الديزل مقطر نفطي أثقل من البنزين يجعل سعره أرخص*. وقد تم التغلب في السنين



الشكل 20.3 أجزاء محرك السيارة الرئيسية
(أ) كتلة المحرك.
(ب) المحور القلاب والمكابس.
(ج) تجميعة المحرك.
مقتبسة عن: .Judge (1972)

* الحقيقة أن ما يقرر السعر هو كمية العمل المطلوب لإعداد المنتوج وقضية العرض والطلب. في السنين الأخيرة ومع انتشار استخدام محركات الديزل لسيارات الركوب زاد الطلب عليه كثيراً، كذلك فإن المواصفات الحديثة تطلب =

الأخيرة على العوائق التي كانت في محركات الديزل مثل إجراءات بدء التشغيل الخاصة ووزن المحرك الكبير. لذا فإن محرك الديزل الذي كان موضع الاعتماد في الشاحنات بدأ يستخدم بصورة أوسع للسيارت*.

ويمكن للكفاءات الحرارية لمحركات الاحتراق الداخلي أن تكون مثالية أعلى من كفاءة محركات الاحتراق الخارجي (دورة البخار). وهذا يعود جزئياً إلى التخلص من بعض الخسائر مثل خسائر المدخنة وخسائر الإشعاع. ويمكن أيضاً الحصول على درجة حرارة أعلى لمادة التشغيل في محركات الاحتراق الداخلي وهذا له مردودات على الكفاءة الحرارية الأعلى (انظر الملحق أ).

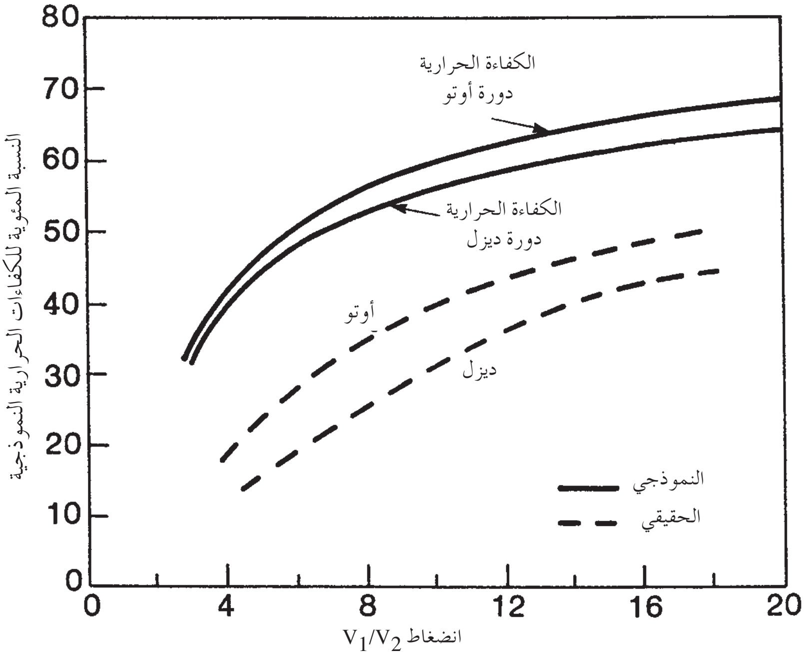
غير أن محرك البنزين العادي أبعد ما يكون عن المثالية. فالسيارة ذات المحرك العامل بالبنزين تمتلك في المتوسط كفاءة حرارية بحدود 26.5 في المئة لنسبة كبس تبلغ 1:5 (الشكل 21.3). وهذا المقياس لمحركات السيارات يدعى الكفاءة المكبحية لأنه لمحرك بسرعة دوران ثابتة (rpm) تعمل ضد مكبح احتكاكي. وهذه القيمة وسطية بين كفاءات مختلف محركات البنزين والديزل (الشكل 21.3) وبمقدور بعضها الحصول على كفاءة تبلغ 44 في المئة لكن كل كفاءة مكبحية تنطبق على سرعة تشغيل واحدة وعلى مخرج واحد للقدرة. ورغم أن مقاييس الكفاءة المكبحية لا تعكس مدى أداء متطلبات القيادة إلا أنها مع ذلك مقياس جيد للإمكانات التقنية الأساسية لتصاميم المحرك.

إن فرصة إعادة استخدام جزء من حرارة الفضلة لتحسين الكفاءة الحرارية في محركات السيارات محدودة بسبب عدم الحفاظ على مادة التشغيل في محركات الاحتراق الداخلي ضمن المنظومة كما هي الحالة في محطات القدرة بالتوربينات البخارية. وقد تركزت محاولات تحسين الدورات الثيرموديناميكية الأساسية لهذه المحركات على نسبة الانضغاط والتي هي نسبة حجم الأسطوانة قبل الانضغاط وبعد الانضغاط. وتزداد هذه النسبة عامة مثلما تزداد الطاقة المتاحة في كل دورة، لذا تزداد

= (ديزل نظيفاً) أي خالياً من الشوائب الكبريتية وغيرها، وهذا يجعل سعره موازياً أو حتى أكثر من سعر البنزين في بعض الحالات.

* المعوق الآخر الذي جرى التغلب عليه والذي يسّر استخدام الديزل لسيارات الركوب هو الصوت المزعج لمضخة حقن الوقود المكبسية التي استبدلت بتصميم جديد غير مكبسي ولا ينتج منه صوت مزعج.

الكفاءة الحرارية كذلك. وكما نرى في الشكل 21.3 يمكن لكلتا دورتي أوتو وديزل الحصول مثالياً على كفاءة تصل إلى 60 أو 70 في المئة عند نِسب انضغاط عالية.



الشكل 21.3

ماكينة احتراق داخلي: كفاءة حرارية مقابل نسبة انضغاط.

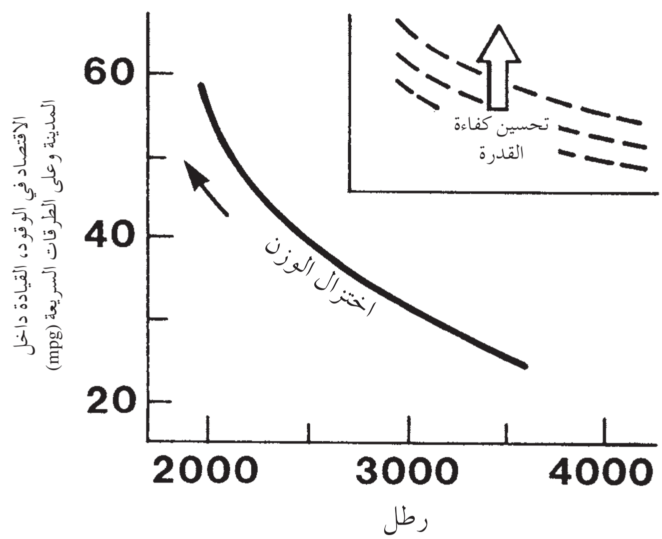
مقتبسة من: Severn and Degler (1948), and Judge (1972).

رغم أننا نرى ارتفاعاً في الكفاءة الحرارية مع زيادة نسبة الانضغاط إلا أن ذلك يحدث بمردودات متضائلة عندما تقترب النسبة إلى 20:1. وتعمل معظم المحركات عملياً اليوم في منتصف المدى لهذا المنحنى على طرفي النسبة 10:1. وأحد أسباب وجود حد أعلى على النسبة لمحركات البنزين هو الاحتراق المبكر (Preignition) (ويعرف عادة باسم الأزيز Ping أو الفرقعة Knock) - والحقيقة أن الاحتراق المبكر يشابه ما يحدث في محرك الديزل. فالذي يحدث هو أن نسب الانضغاط العالية تسبب درجات حرارية عالية وهو ما يؤدي إلى اتقاد ذاتي للسيارة (Auto Ignition) أو اتقاد مبكر. وكانت مضافات من مادة الرصاص تستخدم سابقاً لكبت الاحتراق المبكر لكن هذه المواد أبطل استخدامها الآن للحد من التلوث.

هناك طرق أخرى بجانب الكفاءة الحرارية لقياس أداء محركات السيارات وهي

طرق تعكس أوضاع القيادة في الحياة الواقعية. وأهم الطرق هي اقتصاد الوقود. ومقاييس اقتصاد الوقود مثل أميال لكل غالون (mpg) هي مؤشرات شاملة لكيفية أداء مركبة محددة لمهمتها المصممة. وهذا المقياس على أي حال مجرد مؤشر لكلفة الوقود لإيصال المركبة إلى غايتها ويؤخذ معدله على مديات من السُرعات والتسريع وأحوال الطرق. وهناك مقاييس أكثر وضوحاً لعربات الشحن يعبّر عنها بـ طن ـ ميل لكل غالون (ton – miles per gallon) وهو مؤشر عن كلفة الوقود لنقل كميات محدودة من الحمولة لمسافات محددة. وهذه المعلومات تعكس ثانية معدلاً للسُرع وأحوال الطرق وعادات القيادة وفيها قيود. ومع ذلك فمقاييس مثل أميال لكل غالون أو طن ـ أميال لكل غالون تخبر سائق المركبة ما هو أكثر حول متطلبات الوقود مما تخبره به الكفاءة الحرارية.

ويتضمن اقتصاد الوقود للسيارات في الحقيقة أكثر من مجرد رفع الكفاءة الحرارية للمحرك إلى حدها الأعلى (Horton and Compton, 1984). والوزن بعد كفاءة المحرك هو العامل الرئيس لخفض متطلبات الوقود. وكل خفض في الوزن الكلي للمركبة (الشكل 22.3) يمكّن من تحقيق تحسينات مهمة في اقتصاد الوقود. وهذا يحدث لأن وزناً جامداً أصلياً يحتاج إلى قوة للحصول على الأداء نفسه عند التسريع. وقد تحقق إنقاص الوزن في السيارات (وهناك مجال لإنقاص أكثر) من خلال



الشكل 22.3 تحسين اقتصاديات الوقود مقتبسة من: Horton and Compton (1984).

استخدام مواد أخف مثل مصبوبات الألمنيوم واللدائن والفولاذ واطئ ـ التسبيك. فقد بلغ معدل وزن السيارة المصنوعة في الولايات المتحدة عام 1985 ألفين وسبعمئة باوند مقارنةً بثلاثة آلاف وثمانمئة باوند عام 1975 والذي يتضمن تبعاً للمخطط في الشكل 22.3 كسباً في اقتصاد الوقود يبلغ 72 في المئة في أحوال القيادة على الطرق الخارجية.

ويمكن للتصميم الإنسيابي أن يؤثر في اقتصاد الوقود من خلال تقليص إعاقة (Drag) مقاومة الهواء. وليس من الممكن بالطبع إلغاء مقاومة الهواء بصورة كلية. والحد العملي لتقليل الإعاقة حالياً يبدو بنحو 25 في المئة ضمن التصاميم المتوافرة الآن. ولما كانت إعاقة الهواء ليست إلا جزءاً من الفقد الكلي أثناء السير للسيارة، كانت التحسينات الناتجة في اقتصاد الوقود جزءاً فقط من النسبة المئوية للنقصان في إعاقة الهواء: فنقصان بنسبة 10 في المئة في الإعاقة ينجم عنه في الحقيقة 2 في المئة فقط من التحسن في الأميال لكل غالون.

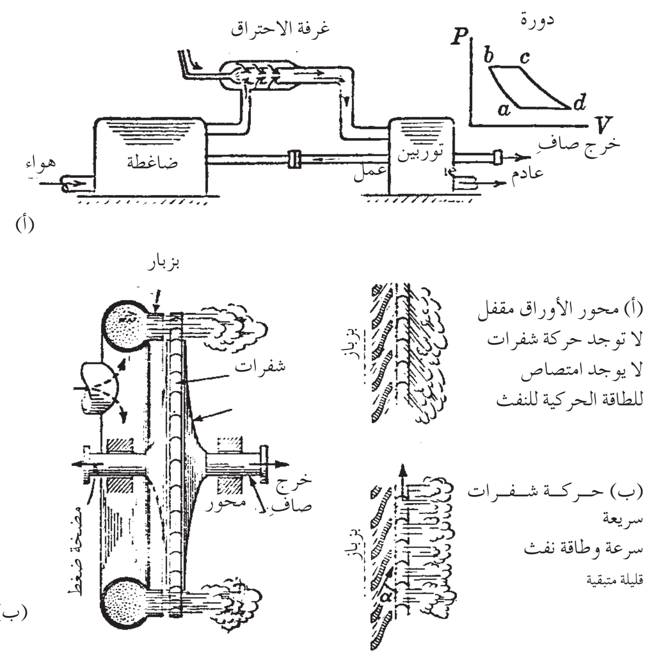
ويتوقع الحصول على تحسينات إضافية من خلال تصاميم سلسلة القوة التي تشمل ابتكارات في الاحتراق والعادم. إضافة إلى تطوير تغيير السرعة وتروس التعشيق (Horton and Compton, 1984). وتعطي أساليب التحكم الإلكترونية للوصول بأداء المحرك إلى حد الكمال مردودات ملموسة أيضاً. وكما في التحسين الانسيابي، لا يمكن توقع زيادة دراماتيكية في كل خطوة، بل إن الابتكارات المفردة ستضيف في الأغلب بضع نقاط مئوية إلى أميال البنزين إنما ستكون هذه الزيادات، وكما سنرى في الفصل الرابع، إذا ما أخذت معاً كبيرة.

من المهم إدراك أن البيانات حول اقتصاد الوقود مهما كانت إمكانية التكنولوجيا محسَّنة، تستند إلى معدل ظروف القيادة، وأن التباين حول هذا المعدل واسعة. إن عادات القيادة الشخصية والأذواق الفردية في اختيار طراز السيارة لها في الحقيقة تأثير هائل في اقتصاد وقود السيارة. ومن العدل القول إن مثل هذه العوامل ذات أهمية على الأقل كالتصميم الهندسي في قضايا سياسة الطاقة القومية (سنبحث في السلوك الإنساني في كافة قطاعات استخدام الطاقة في الفصل الرابع).

التوربينات الغازية

النوع الثالث والأخير من محركات الاحتراق الداخلي هو توربين الاحتراق أو

التوربين الغازي الذي يحرك زخم أو دفع غازات الاحتراق المتمددة الشفرات فيه بدلاً من البخار، وبهذا يحوّل الطاقة الحرارية إلى شغل (الشكل 23.3أ). ونستطيع كما في حالة بقية المحركات تتبع مسالك الدورة الثيرموديناميكية (وتدعى دورة برايتون (Brayton Cycle)) على مخطط ضغط ـ حجم (p-V). بدءاً عند النقطة (*a*) يكبس الهواء المغذى إلى النقطة (ب). ويجري تزويد الحرارة في غرفة احتراق منفصلة تغذى بالهواء المضغوط في ضغط ثابت (المسلك *b-c*). يتبع هذا تمدد (المسلك *c-d*). والتمدد في هذه الحالة هو لغازات احتراق ـ ساخنة عالية الضغط (الشكل 23.3ب).



الشكل 23.3
الاحتراق الأساسي في محطة توربين غازي
قاعدة عمل التوربين الغازي مقتبسة من .(1947) Morse
(أ) الاحتراق في مصنع توربيني غازي. (ب) مبادئ عمل التوربين الغازي

هذه العملية تختلف اختلافاً كبيراً عن العملية التي تحرك دورة التوربين البخاري. فغازات الاحتراق الساخنة **أولاً** هي مادة التشغيل في التوربين، فهي تدخل وتتمدد مباشرة خلال شفرات التوربين خلاف الدورة البخارية التي تستمد مادة التشغيل

حرارتها من احتراق الغازات في الفرن. الشيء **الثاني** هو أن دورة برايتون الحرارية[6] للتوربين الغازي هي دورة مفتوحة – على خلاف دورة التوربين – البخاري، ذلك لأن الغازات الساخنة ترسل خلال العادم ببساطة إلى الجو. **وأخيراً**، فإن مادة التشغيل لدورة التوربين الغازي لا تمر في تبدل طور عندما تسير عبر مسالكها الثيرموديناميكية.

تمتلك دورة التوربين الغازي كفاءة مكبحية تصل إلى ارتفاع 30 في المئة. ويمكن إحراز استغلال أفضل للمشتقات النفطية أو الغاز الطبيعي من خلال تشغيل التوربين الغازي في دورة مدمجة مع منظومة توربين بخاري. يجري في هذه الدورة استخدام غازات العادم الساخنة من منظومة التوربين الغازي لتسخين (أو لتسخين مسبق) البخار في دورة حرارية. وبذلك يجري استخدام الحرارة المبددة في التوربين الغازي في دورة ثيرموديناميكية مدمجة مما ينجم عنه كفاءة حرارية أعلى. وتصل الكفاءة الحرارية في عمليات الدورة المدمجة إلى حدود 50 في المئة. وهناك عدد كبير من المحطات العاملة اليوم تَستخدم هذه الطريقة.

الاستنتاجات

نود عند هذه النقطة أن نعيد التشديد على أهمية هذه التكنولوجيات التقليدية لتحويل الطاقة. وهي مسؤولة كما سنرى في الفصل التالي عن مجمل عمليات النقل وتوليد الكهرباء لدينا فعلياً وعن أكثر من نصف استهلاكنا من موارد الطاقة بصورة عامة. والتكنولوجيات التي جرى بحثها في هذا الفصل هي السبب الرئيس لاحتياجنا ورغبتنا في مصادر الطاقة. وهي المحركات الرئيسة للعالم الصناعي الحديث.

لمزيد من الفائدة يراجع:

Faires, V. M.. *Heat Engines*. New York: MacMillan, 1948. Elementary engineering level, but with much understandable to the layman; good figures.

Horton, E. J. and W. D. Compton. «Technological Trends in Automobiles.» Science: 10 August 1984. pp. 587-593. Review of contemporary trends in automotive technology.

Judge, A. W. *Automobile Engines*. Cambridge, MA: Robert Bentley, 1972. Detailed descriptions of engines, with numerous figures; also, design and operation.

6 سميت باسم جورج ب. برايتون (George B. Brayton) (1830 – 1892) وهو مخترع أميركي وكان قد ابتدع ماكينة سميت محرك برايتون.

Lamme, B. G. «High Speed Turbo-Alternators - Designs and Limitations.» American Institute of Electrical Engineers Transactions (1919). Reprinted with commentary in *Proceedings of the IEEE*: vol. 72, no.4, April 1984. pp. 493-526. History of the modern steam-driven turbine electrical generator, excellent for gaining understanding of operation.

Park, H. E. *Auto Engines of Tomorrow*. Bloomington, IND: Indiana University Press 1975. A popular level exposition of automotive engines.

Rose, D. J. *Learning about Energy*. New York: Plenum Press, 1986. The insights of a longtime researcher in energy technologies.

Setright, L. J. K. *Some Universal Engines*. London: Mechanical Engineering Publications, The Institution of Mechanical Engineers, 1975. An interesting history of internal combustion technology, also helpful to understanding operation.

Singer, J. G. (ed.). (or latest edition). *Combustion Engineering. Fossil Power Systems. A reference book on fuel combustion and steam generation with photos and figures of the latest contemporary designs*. Windsor: CT, 1981.

Tarboux, T. G. *Electric Power Equipment*. New York: McGraw-Hill, 1946. Good descriptions of electrical machines with photos and drawings; the layman can ignore the theoretical sections.

Woodruff, E. B. and L. B. Lammers. *Steam Plant Operation*. New York: McGraw-Hill, 1977. Good descriptions with clear figures on furnaces, boilers and combustion processes; the layman can ignore the engineering data in text.

المراجع

Davis, C. V. and K. E. Sorenson. *Handbook of Applied Hydraulics*.3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1969.

Elgerd, O. I. *Basic Electric Power Engineering*. Reading, MA.:Addison-Wesley, 1978.

Morse, F. T. *Elements of Applied Energy*. New York: Van Nostrand, 1947.

Severns, W. H. and H. E. Degler. *Steam, Air and Gas Power*. New York: Wiley, 1948

الفصل الرابع

الطلب على الطاقة

مقدمة

يستخدم المجتمع الصناعي الحديث كميات هائلة من الطاقة في كل لحظة. فهو يحتاج إلى الطاقة لتشغيل ماكيناته وتوفير القدرة لعمليات النقل وتوفير الحرارة والضوء والتبريد. ونحن نعتمد على الاستجابة اللحظوية للمفتاح الكهربائي على الجدار وعلى موثوقية محركات الاحتراق الداخلي. ويعتمد الناس في أساليب حياتهم على الثقة في توفّر مصادر الطاقة بسهولة. وإن افتقدت تلك الثقة فإن العالم المتطور سيتغير بطريقة جذرية.

ونحن جميعاً كأفراد مستهلكين للطاقة – وجزء من سوق قومية ودولية. وطلب كل فرد على الطاقة ربما يختلف عن الفرد الآخر، ومجموع الطلب على الطاقة في مجتمع بكامله قد يكون مختلفاً نوعاً ما عن طلب مجتمع آخر. ومع ذلك فإننا جميعاً ـ كأفراد أو مجتمع – نطلب كميات محددة من الطاقة بهيئة وقود وموارد من سوق الطاقة. ومقدار ما نحتاج إليه والعوامل التي تؤثر في قرارات طلبنا مسائل لها أهميتها ولن يقتصر ما تخبرنا به الإجابات على مقدار ما نستهلكه، بل في ما إذا كان باستطاعتنا الاستمرار باستخدام المقدار نفسه. وتعتمد على ذلك السؤال استمرارية أساليب الحياة التي نشأنا معتادين عليها وكذلك صحة اقتصاد المجتمع الصناعي ذاته.

لهذه الأسئلة مردودات ذات أهمية خاصة بالنسبة إلى المستقبل الأكثر بعداً. فمصادر الطاقة الأحفورية الحرجة، وكما رأينا في الفصل الثاني محدودة. والنقطة البدهية هي أننا إذا ما استخدمنا أقل الآن فسيكون لدينا كمية أكبر للمستقبل. لكن علينا هنا أن نتساءل: ما الذي سيحدث للاقتصاد إذا ما استخدمنا كمية أقل؟ هل

بإمكاننا تقليل الاستهلاك (أو الطلب) الآن من دون تقديم تضحية كبيرة، ومن دون تغيير جذري في طريقة الحياة التي اعتاد الناس على توقعها؟ وإذا ما استطعنا التقليل فبأي مقدار وكم هي الكمية وبأي وسائل يمكننا تحقيق ذلك؟ أو أننا في جوهر الأمر نستطيع اختصار القضية في سؤال واحد مثير للجدل: هل نحن بحاجة في الحقيقة إلى كل ما نستهلكه؟

الطلب على الطاقة: مراجعة للنموذج السوقي

سيركز هذا الفصل على الطلب على الطاقة. غير أن الطلب على الطاقة من وجهة نظر المتخصص بالاقتصاد لا تختلف في بنيتها الأساسية من الطلب على أي سلعة أخرى أو مجموعة من السلع. وطلب المستهلك في الحقيقة مكون أساسي للاقتصاد بحد ذاته ـ وهو مفهوم لا انفصام له عن الأوصاف الاقتصادية لاقتصاد السوق أو حتى إلى درجة ما للاقتصاد الاشتراكي.

ليست هناك ببساطة فكرة عن الطلب في النظرية الاقتصادية. فالطلب له مقام «قانون»[1] اقتصادي. ورغم أن هذا القانون يقر بوجود استثناءات ممكنة ويحتاج إلى نقاش طويل وكلام مسهب إلا أن له إثباتات وافرة.

وقانون الطلب هو علاقة بين كمية أي سلعة (أو بضاعة) يطلبها المستهلكون وسعر السلعة. وينص في أساسه على أن الكمية المطلوبة من سلعة ما تتناسب عكسياً مع سعرها، أو ببساطة كلما زاد السعر كلما قل طلب المستهلك.

وهناك تقييد مهم لهذا القانون. وهو أنه لا ينطبق إلا بافتراض تساوي كل الأشياء الأخرى. ولما كان اقتصاد السوق بالغ التعقيد ويتغير باستمرار، لذا يصبح التقييد واسعاً جداً لأن «كل» يجب أن تشمل كل شيء بصدقٍ. فعندما ننظر مثلاً في الطلب علينا إدراج كافة المتغيرات غير الاقتصادية والتي لا يمكن إعطاؤها قيمة مثل الذوق. فما كان شائعاً البارحة قد لا يكون له سوق اليوم حتى بنصف السعر. ويتأثر الطلب أيضاً بعناصر غير سعرية مثل النمو السكاني.

---

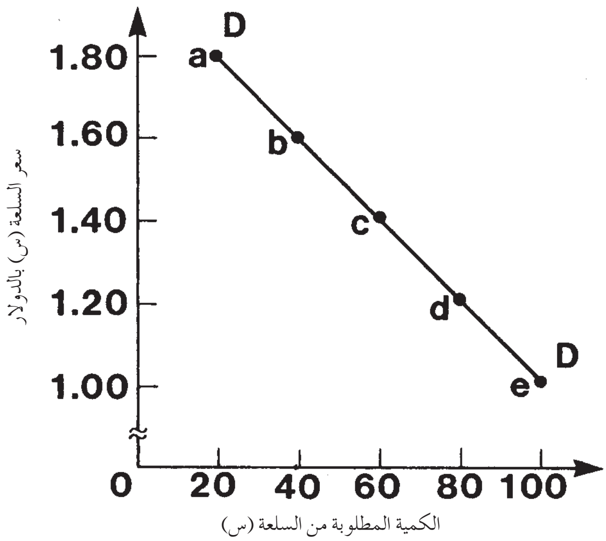
1 هناك قانون مقابل للتجهيز يؤكد أن المنتجين سيجهزون مقادير متزايدة من السلع كلما زادت الأسعار.

وهناك محددان غير سعريين للطلب لهما أهمية خاصة في ما يتعلق بسوق الطاقة: الدخل القومي (كل من دخل الفرد ومجموع الدخل القومي) وأسعار السلع ذات العلاقة. ويعكس المحدد **الأول** حالة النمو الاقتصادي بصورة عامة والتي يمكن بدورها أن تؤثر على مقدار ما نستهلكه من أي سلعة. أما المحدد **الثاني** فيشمل الأسعار بين المواد القابلة للتبادل في ما بينها أو السلع التي تعتمد على بعضها البعض بصورة تبادلية (نستطيع بسهولة تصور كيف يمكن للطلب على سلعة أن يتأثر بأسعار بدائل واضحة مثل المارغرين والزبدة. غير أن الطلب على سلعة قد يتأثر بأسعار ليست بديلة منه مثل الطلب على العمالة الذي قد يتأثر بكلفة رأس المال)[2]. وهذه عناصر ذات دلالة، وسيجري بحثها هنا ضمن مفهوم الطلب على الطاقة. لكن حتى إذا ما كانت علاقة السعر/ الكمية لا توفِّر الصورة الكاملة إلا أنه أساسي على أي حال ويجب أن يكون نقطة البداية في أي نقاش اقتصادي للطلب على الطاقة.

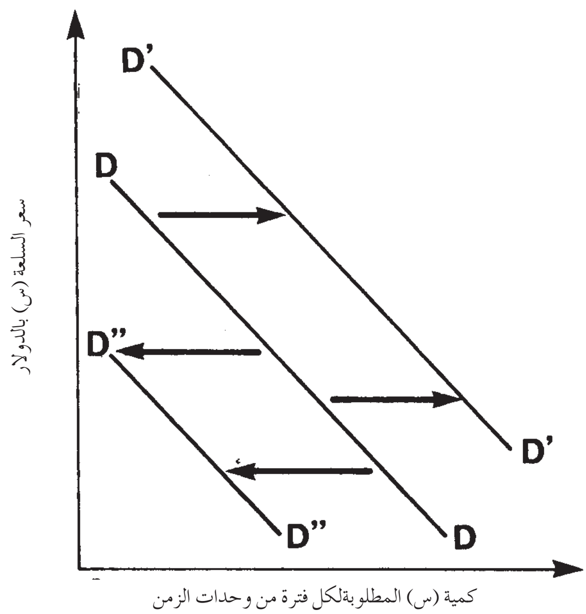
يمكن التفكير بالطلب كبرنامج. ويجب في أي وقت معين ـ يجب أن تكون جدولة الطلب محددة ضمن إطار زمني معلوم – أن يحدد سعر السلعة مثل البنزين طلباً على كمية معينة من قبل المستهلكين. فقد يطلب المستهلكون في الولايات المتحدة ملياري غالون في الأسبوع عند سعر 1.50 دولاراً للغالون. وقد ينخفض الطلب إلى 1.5 مليار غالون إذا ما ارتفع السعر إلى دولارين بينما سيرتفع إلى 2.5 مليار غالون إذا ما انخفض السعر إلى دولار واحد. ومن المهم أن نتذكر أن كل هذه العلاقات للسعر/ الكمية صحيحة بالتزامن في هذه الفترة الزمنية المحددة. وأي تغير في السعر يعني أن الكمية المطلوبة ستتغير. غير أن البنية الأساسية للطلب كما يصورها البرنامج لم تتغير. ويصور الاقتصاديون برنامج طلب المستهلك عادة كمنحنى مائل إلى الأسفل (الشكل 1.4). ورغم أن المنحنى الظاهر هنا خطّي إلا أن شكل المنحنى وانحدار ميله قد يختلفان من سوق إلى سوق أو حتى داخل السوق نفسه من فترة زمنية إلى أخرى. ومع ذلك فإن الطلب على الموارد المفردة في سوق الطاقة كما على مجموع الطلب على الطاقة يمكن أن تصور دائماً ببعض هذه المنحنيات.

2 السلع الرأسمالية في الاقتصاد تشير إلى تلك السلع المستخدمة في الإنتاج وبخاصة المعدات والماكينات. أما رأس المال فهو عادة يشير إلى النقد. وفي هذا الكتاب سنستخدم عبارة رأس المال وحدها للمعنى الأول، لكننا على أي حال سنشير في بعض الأوقات إلى المصادر المالية بصورة محددة وسندعوها رأس المال النقدي.

وتؤدي التغيرات السعرية إلى تغيرات في الكمية المطلوبة، لكن السعر لا يغيِّر الطلب (أي البرنامج). ويحدث التغير في الطلب لأسباب غير سعرية وتعبير «تغير في الطلب» يعني على وجه الثقة أن المنحنى ذاته قد تحرك وسيكون لتغييرات السعر تأثير مختلف في الكمية. تأمل مثلاً زيادة سكانية بسبب الهجرة (الشكل 2.4). نستطيع أن نرى أن المنحنى تحرك إلى اليمين. والآن تبعاً لهذا البرنامج الجديد يزيد الطلب على الطاقة في كل سعر.



الشكل 1.4 منحنى الطلب

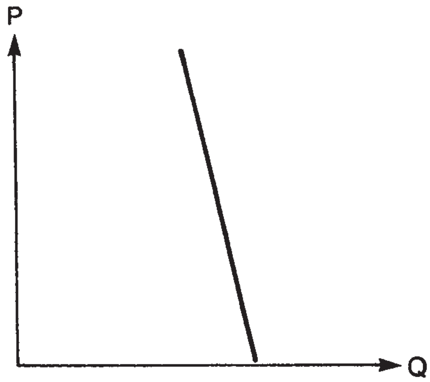


الشكل 2.4

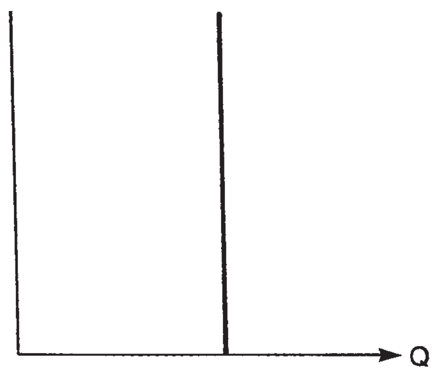
تغير في الطلب. إن التحرك من D إلى ´D ينجم عن زيادة في السكان. أما التحرك إلى ´´D فيمثل نقصاً في عدد السكان.

اقتبس من R. L. Miller, 1982 Microeconomics, Intermediate McGraw – Hill, New York.

إن شكل وميل أي منحنى للطلب هما خاصيتان مهمتان ليس لأنهما تصوران برمجة الكميات والأسعار وحسب، بل أيضاً لأنهما تبيِّنان استجابة الطلب للتغييرات في الأسعار، وهذا ما يدعى (مرونة الطلب السعرية (Price Elasticity)). لذا فإن ميلاً شديد الانحدار يعني أن الأسعار يجب أن تتغير بدرجة كبيرة قبل أن يكون هناك تغير ملموس في كمية الطلب (انظر الشكل 3.4أ).



(أ) منحنى طلب غير مرن نسبياً (ميل شديد)



(ب) منحنى طلب غير مرن بتاتاً (ميل عمودي)

الشكل 3.4
(أ) منحنى طلب غير مرن نسبياً (ميل شديد)
(ب) منحنى طلب غير مرن بتاتاً (ميل عمودي)

ومن الممكن في الحقيقة تصور منحنى عمودي تقريباً (الشكل 3.4 ب) حيث يستمر الطلب على قدر معين من السلعة بغض النظر عن السعر. وقد بدا لفترات قصيرة أن الطلب على أنواع محددة من الطاقة غير مرن نسبياً، أي إنه أظهر منحنى شبه عمودي. وهذا ما حدث مع البنزين بعد ارتفاع الأسعار بصورة دراماتيكية في السبعينيات. ولم يكن هناك في المناطق الريفية من الولايات المتحدة، حيث يستخدم البنزين لتشغيل الماكينات الزراعية، إلا القليل من التغير في كمية البنزين المستخدم رغم ارتفاع السعر. ومن الضروري جداً على أي حال أن لا يغيب عن التفكير أن منحنى يمثل فترة زمنية قصيرة يمكن أن يكون له شكل ومنحنى مختلف عن منحنى يمثل فترة زمنية طويلة للسلعة نفسها.

ورغم أن الميل يمثل المرونة في منحنى الطلب إلا أن الانطباع البصري قد يكون مضللاً. فالمنحنى شديد الميل علامة بعدم الاستجابة أو عدم المرونة في الطلب. أما المنحنى المستوي فيشير إلى مرونة عالية في الطلب. لكن المرونة يمكن أن تتغير من جزء في المنحنى إلى الذي يليه، ويمكن أن يكون المنحنى الذي يبدو مرناً جداً على عكس ذلك اعتماداً على أي جزء من المنحنى يجري قياسه.

ويمكن تعريف مرونة السعر (E) للطلب بنسبة بسيطة.

$$\text{E} = \frac{\text{النسبة المئوية لتغير الكمية } (Q)}{\text{النسبة المئوية لتغير السعر } (P)}$$

$$\text{E} = \frac{[dQ/Q]}{[dP/P]}$$

حيث إن dQ هي التغير في الكمية، وdP هي التغير المقابل بالسعر. خذ مثالاً حيث تكون E=1. وهذا يعني أن أي تغير في النسبة المئوية للسعر dP/P سيكون هناك تغير مماثل في الكمية المطلوبة dQ/Q. وهذا ما يدعى مرونة الوحدة (Unit Elasticity). أما إذا كانت E من ناحية أخرى أقل من واحد فسيكون التغير في الطلب أقل من النسبة المئوية للتغير السعري – أو أن الحالة غير مرنة نسبياً. أما المنحنى العمودي فيعني أن المرونة تساوي صفراً، حيث لا يحدث أي تغير في الكمية المطلوبة بغض النظر عن السعر. (كما في الشكل 3.4 ب). وحيث تكون E أكبر من واحد (مرنة جداً) فستكون التغيرات في الكمية المطلوبة أكبر كنسبة مئوية من تغير السعر وذلك يعني أن السوق متجاوبة جداً مع تغير السعر.

إن مقدار التغير في السعر الذي يؤثر في الطلب قد يعتمد جزئياً على قدرة المستهلكين استبدال سلعة بأخرى. ويمكن على سبيل المثال لمستخدمي الفحم الصناعيين إذا ما ارتفع سعره أن يعوضوا عنه بالغاز الطبيعي أو النفط. (وهناك في الواقع بعض الأفران الصناعية التي يمكن تكييفها بسهولة لاستخدام أنواع مختلفة من الوقود). لذا فإن ارتفاع سعر نوع من الوقود يرفع الطلب على نوع آخر. ويقال في تلك الحالة إن العلاقة بين السعر/ الكمية بين الفحم والغاز الطبيعي إيجابية. ولا يقتصر التعويض في سوق الطاقة على الاختيار بين مصادر مختلفة. فإذا ما ارتفعت أسعار الطاقة بدرجة كبيرة يمكن للمستهلك أن يختار التعويض بطرق عمل كثيفة العمالة (أو كثيفة التحويل) عن تلك التي تتصف باستخدام كثيف للطاقة. ويمكن بعبارة أخرى لرب العمل أن يغلق جزءاً من ماكيناته كثيفة الاستخدام للطاقة ويستخدم عدداً من العمال لأداء المهمات نفسها يدوياً.

إن حساسية الطلب على السلعة (x) للتغير في السعر (y) يُدعى المرونة المتبادلة للطلب (Cross Elasticity of Demand) ويمكن ببساطة احتسابها كالآتي:

$$E_{xy} = \frac{\text{النسبة المئوية للتغير في } Q_x}{\text{النسبة المئوية للتغير في } P_y}$$

والمعادلة الرياضية كالآتي:

$$E_{xy} = \frac{[dQ_x/Q_x]}{[dP_y/P_y]}$$

$$= \frac{[dQ_x/P_y]}{[dP_y/Q_x]}$$

حيث إن Q_x هي كمية إحدى السلع، وP_y هي سعر نوع آخر من السلع. لذا فإذا ما كانت السلعتان الفحم والغاز الطبيعي فستكون قيمة E_{xy} أقرب إلى الوحدة كلما ازداد عدد الأفران الصناعية القابلة للتبديل. ويجب أن يلاحظ أن المرونات المتبادلة للسلع ذات العلاقة ليست إيجابية دائماً. ففي بعض الحالات عندما يزداد سعر سلعة ما ينخفض الطلب على سلعة ذات علاقة. فإذا ارتفع سعر السيارات مثلاً فسينخفض الطلب عليها وسينخفض الطلب على البنزين نتيجة ذلك. وحيثما تكون العلاقة سلبية

فهي تدعى سلع متممة (Complementary).

ومستوى الدخل عامل مهم آخر غير سعري يمكن أن يؤثر في الطلب. فيمكن للشخص أن يصرف مبلغاً محدداً على الطاقة لتلافي احتياجات أساسية في ما إذا ارتفع أو انخفض دخله أو ارتفع أو بقي ثابتاً. غير أن ارتفاع دخل الفرد قد يؤدي إلى إزدياد صرفه وخصوصاً على المشتريات غير الضرورية والتي قد ينجم عن بعضها ازدياد استهلاك الطاقة. فالشخص نفسه مثلاً قد يختار أن يصرف أكثر على المعدات الكهربائية المستهلكة للطاقة وعلى سيارة ثانية أو أكثر وعلى سفرات أطول بالسيارة.

إن استجابة الطلب على سلعة لتغير الدخل (I) – مرونة الدخل (Income elasticity) للطلب – يمكن احتسابها بالطريقة نفسها مثل المرونة – المتبادلة بواسطة النسبة.

$$E_I = \frac{\text{النسبة المئوية للتغير في } Q}{\text{النسبة المئوية للتغير في } I}$$

ويفترض هنا مثلما في بقية المقاييس أن الدخل فقط يتغير، وأن كافة الأشياء الأخرى بما فيها السعر تبقى غير متغيرة.

مثل هذه المفاهيم للطلب الاقتصادي يمكن أن يزخرف ويصفّى أكثر من هذا، لكن الدراسة الحالية توفِّر إطاراً كافياً لفهم الطلب على الطاقة. وعلينا في أي حال قبل أن نتعامل مع دقائق صورة الطلب أن نفكر بالسياق الأوسع الذي يحدث فيه الطلب على الطاقة: فكرة سوق الطاقة ذاته. ونحن نفترض عندما نفكر بنموذج الطلب لدينا أن يكون هناك نظام توزيع موارد الطاقة يقرره السوق، وهو شبكة دولية من المجهزين والمستهلكين يبيعون ويشترون تبعاً للطلب وتوفر التجهيز – وغالباً ما يكون متحرراً من أي تدخل حكومي. وفي السنين الأخيرة فكر بعض المراقبين في ما إذا كانت أسواق الطاقة تعمل كما يؤدي بنا النموذج لتوقعه، أو في ما إذا كانت تعاني «عيوباً». وقد طالب هؤلاء النقّاد بتدخل حكومي في السوق من أجل تحديد الحصص لمصادر الطاقة. وبدا أن منهاج العمل هذا فيه بعض المعقولية في نهاية السبعينيات عندما بدا أن السوق غير قادرة على الاستجابة لارتفاع الأسعار: فسعر النفط على وجه التخصيص حلق مرتفعاً، في حين لم ينخفض الطلب إلا قليلاً. وقد برهنت سوق الطاقة، كما

سنرى، أنها أكثر تعقيداً مما اعتقده النقاد في حينه. وبغض النظر عما إذا كانت السوق «تعمل» أو لا تعمل فقد تكون هناك قضايا مهيمنة أكبر تخص سياسة السوق لم تتمكن التجارب السابقة ولن تقدر حتماً من تقديم إجابة لها، أي هل أن السوق الحرة تؤدي إلى توزيع للموارد أكثر فاعلية (وهل إنها تعمل بالطريقة الأمثل)؟ وهل إنها تعمل بطريقة عادلة؟ وهل إن السياسة الجيدة هي ترك التقدير المستقبلي لاستهلاك الطاقة إلى السوق وحدها؟

استخدام الطاقة والنشاط الاقتصادي

علينا قبل أن نفكر بهذه المسائل الأوسع أن نفهم العلاقة بين استهلاك الطاقة (الطلب) والنمو الاقتصادي ـ حيث إن السعي وراء النمو يكمن خلف أو يبرر على الأقل معظم سياسات الموارد.

لا شك أن استهلاك الطاقة هو مركّب ضروري للمجتمع الصناعي، وقد اقترحنا سابقاً احتمال وجود علاقة إيجابية بين نمو الدخل والنمو في استهلاك الطاقة. دعنا بصورة عامة، نستمر في التوكيد أن زيادة الدخل يصاحبها زيادة في استهلاك الطاقة عندما يبقى كل شيء آخر ثابتاً. وحتى مع هذا الافتراض علينا أن نفكر أن الصرف بحذر قد يشمل من خلال تعريفه تشكيلة من الخيارات قد تكون كثيفة الاستخدام للطاقة أو قد لا تكون.

لنرَ بصورة خاصة ردة الفعل التي قد تصدر من شركة صناعية أو تجارية عند زيادة مدخولها. سنفترض أن المشروع سيحاول الوصول بربحيته إلى حدودها القصوى وسيختار استثمار بعض مدخوله الجديد في زيادة مخرجه المستقبلي. ويمكن تصور أن هذا الخيار يتضمن تقليل لا زيادة عبء كلفة الطاقة. وعندما يكون الخيار على وجه التخصيص لزيادة المنتوج فقد يستثمر المنتج في عماله أو رأس مال قليل الاستهلاك للطاقة – من توظيف عمال جدد مثلاً أو شراء سلع رأسمالية قليلة الاستهلاك للطاقة مثل الحاسوب لتسريع عملية الإنتاج. لكن ما العمل إذا كانت فرص الاستبدال عن هذا النوع قليلة؟ وما العمل إذا ما كانت أكثر فرص الاستثمار ربحية تقود إلى استهلاك أكبر للطاقة؟ عندها يتوقع أن تستهلك الشركات طاقة أكثر لدى توسيع إنتاجها. وإذا ما كانت هذه الحالة عامة خلال الاقتصاد حيث إن الاستهلاك ينمو لا محالة وكذلك

الدخل. والحقيقة أنه إذا ما كانت فرصة الاستبدال بالعمالة أو رأس المال محدودة فيجب أن تنمو الطاقة عندما يتوسع الاقتصاد. ويفترض أن أي زيادة ملموسة للمنتوج لا يمكن إحرازها بأي طريقة أخرى.

كان كثير من الاقتصاديين ومن محللي الطاقة حتى زمن قريب مقتنعين أن الطلب المتزايد على الطاقة هو نتيجة ضرورية للنمو الاقتصادي. وتبعاً لهذا المنظور فإن نتيجة استخدام كمية أقل كانت ذات فاعلية اقتصادية متضائلة لا يمكن تجنبها – أي ركود اقتصادي – والنتيجة النهائية هي انخفاض مستوى المعيشة. ويبدو ظاهرياً أن التاريخ يدعم هذه القناعة. فاستخدام الطاقة في الولايات المتحدة اعتباراً من أواسط الثلاثينيات وصاعداً كان يزداد ليس بكميات مطلقة وحسب، بل على أساس استهلاك الفرد أيضاً. وكان النمو الاقتصادي في الوقت ذاته كما هو مقاس بالدخل القومي الإجمالي أو بمجموع إنتاج السلع والخدمات (أي الناتج المحلي الكلي) ينمو أيضاً على أساس الفرد أو على أساس كلي. والملحوظ أن الناتج المحلي الكلي نما كما يبدو بنسبة ثابتة قياساً إلى استهلاك الطاقة. وحتى خلال التعثرات القليلة في مسار النمو كان يبدو أن الاثنين كانا يتبعان الخطى نفسها.

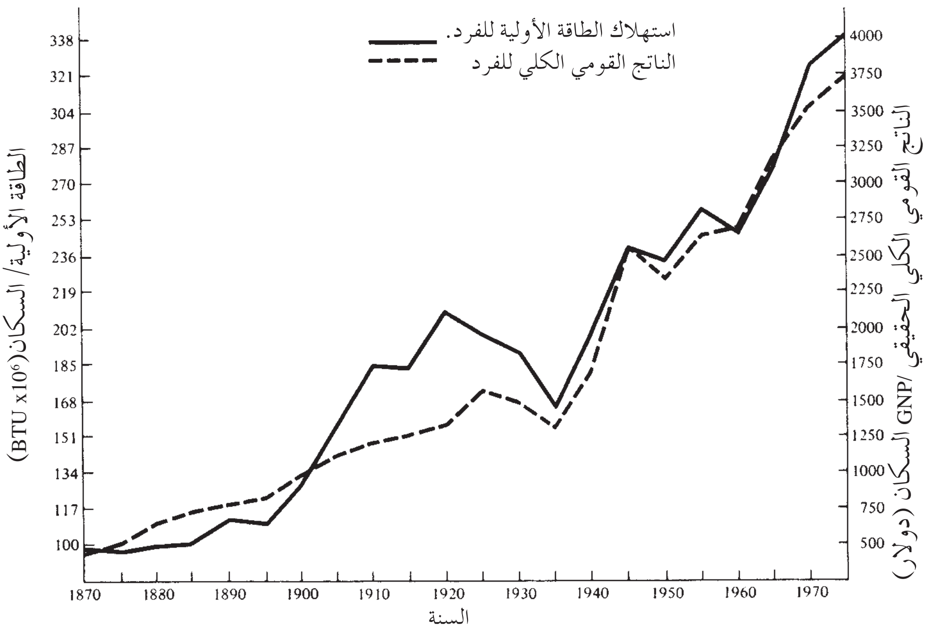
يبين الشكل 4.4 عدم وجود إلا قليل من الارتباط بين نمو استهلاك الفرد من الطاقة ودخل الفرد من الناتج المحلي الكلي قبل الثلاثينيات. لكن بدءاً من قبل الحرب العالمية الثانية بدا أن نمو استهلاك الفرد للطاقة ونمو دخل الفرد من الناتج المحلي الكلي كانا يتحركان بالترادف. ومن الصعب في الحقيقة الهروب عند النظر إلى الخط البياني من الاستنتاج القائل إن هناك ترابطاً دقيقاً بين نمو الناتج الإجمالي المحلي والنمو في استخدام الطاقة. وإن هذا الترابط قائم عبر نصف القرن المنصرم. وإذا ما كان ذلك صحيحاً فهو شيء تشاؤمي أساساً، إذ إن ذلك يدل ضمناً إلى أن لمجتمع الولايات المتحدة خيارين: إما أن يستخدم طاقة أكثر، أو أن يعيش بصورة أقل جودة. وتبعاً لهذا السيناريو فمن غير المتوقع للتقدم التقني أن يمكّن استمرار النمو الاقتصادي مع استهلاك أقل للطاقة. ويشكك هذا المنظور بالافتراضات الاقتصادية القياسية حول آلية السعر في سوق الطاقة. ولما كانت أسعار الطاقة لا تنمو باستمرار بسرعة الناتج الإجمالي المحلي نفسها فهل أن آلية السعر فاعلة فعلاً، أم أن استهلاك الطاقة أسير مرونة الدخل فقط؟ وإذا ما كانت هذه هي الحالة فسيكون لدينا خياران مرة أخرى: استهلاك متزايد للطاقة أو مستوى معيشي أدنى.

لقد ساند بعض اقتصاديي السوق الحرة ممن كان يتوقع أن يكون لديهم إيمان أكبر في آلية السعر وممن كانوا ارتأوا فرصاً أكثر لاستبدال هذا السيناريو الكئيب. ففي دراسة أعدها بنك تشيس مانهاتن عام 1972 مثلاً لم يكن باستطاعة المتوقعين أن يفكروا إلا بخيارات قليلة – أحدها تقليص وقت مشاهدة التلفزيون – لتوفير الطاقة مع زيادة الناتج المحلي الكلي.

وبدا مثل هذا الرأي منطقياً مع ذلك، وفي ضوء النمط الذي يظهر في الشكل 4.4. وكان الدليل الوحيد الذي جاء على نحو معاكس معلومات مقارنة بين استهلاك الولايات المتحدة واستهلاك معظم الأقطار الصناعية الأخرى. ورغم أن الناتج المحلي الكلي للفرد الواحد لأقطار أوروبا الغربية أقل على نحو نموذجي، وغالباً يقارن بمثيله في الولايات المتحدة إلا أن استهلاك الطاقة للفرد الواحد في أوروبا كان عادة أقل على نحو نموذجي وغالباً ثلث الكمية أو أكثر. ومع ذلك، فإن المعلومات المقارنة رغم أنها تعلمنا الكثير، إلا أن لها محدداتها فليس هناك من بلدين متشابهين تماماً. فالولايات المتحدة الأوسع مساحة والتي تمتلك كمية أكبر من الصناعة الثقيلة (وبخاصة في الفترة التي تلت الحرب مباشرة) لا يمكن مقارنتها بفرنسا أو هولندا أو بريطانيا.

لكن بدا أن الاستنتاجات التي ثبتت علاقة الناتج المحلي الكلي بالطاقة تجاهلت ما كان يحدث فعلاً في السوق. فأسعار الطاقة بقيم نقدية ثابتة (أي مع الدولار المثبتة قيمته في زمن مرجعي ومعدل بحسب التضخم) هبطت بصورة عامة خلال معظم الفترة بين عامي 1945 و1972. والنفط على وجه التخصيص أظهر انخفاضاً في أسعاره الحقيقية وكان أرخص بنسبة 27 في المئة عام 1970 (بالدولات المنكمشة) مما كان عليه عام 1950. وقد خفضت المشاريع الكهرومائية الكبيرة الكلفة الحقيقية للقوة الكهربائية أيضاً خلال معظم هذه المدة وأوجدت في الوقت ذاته فائضاً كبيراً في الطاقة في أجزاء من الولايات المتحدة. وقدمت شركات تجهيز الطاقة محفزات للمستخدمين ليستهلكوا أكبر كمية ممكنة من الكهرباء: نظام تسعير خفض سعر وحدة الاستهلاك (كيلوواط – ساعة، انظر الملحق أ) كلما زاد استهلاك المستخدم. والذي يعنيه هذا هو أن استهلاك الطاقة ربما كان في الحقيقة يتبع المسلك الكلاسيكي الذي كان الاقتصاديون قد توقعوه – لكنه يستند إلى السعر وليس إلى الدخل. إنه يعني

في الحقيقة أن مسلك النمو ذي النهج الجامد للناتج المحلي الكلي والطاقة لم يكن إلا سراباً من أحد الأنواع حرضت عليه أسعار الطاقة المنخفضة. في الواقع لو أن أسعار الطاقة بقيت ثابتة ببساطة فقط كان من الممكن أن الطلب لم يكن لينمو بالسرعة نفسها، وأن فجوة بين نمو الناتج المحلي الكلي ونمو الطاقة كانت ستتطور. لكن ما حدث هو أن الأسعار الفعلية الهابطة كانت قضية شجعت الاستهلاك وأثبطت همة المبتكر التقني للحصول على كفاءة أفضل ولم يكن هناك محفز معين لتقليل تركيز الطاقة في العمليات الإنتاجية عندما كانت كلفة ذلك العنصر[3] في الإنتاج تهبط. وقد جرى على نقيض ذلك دعم نمو كبير للتغير التكنولوجي كثيف الاستخدام للطاقة ومقلص الحاجة للعمالة.



الشكل 4.4

حصة الفرد من الناتج القومي الكلي واستهلاك الطاقة في الولايات المتحدة. ملاحظة: تقاس الفعالية الاقتصادية في بعض الجداول والمخططات في هذا الفصل بالناتج القومي الكلي (GNP) بدل الناتج المحلي الكلي (GDP). والفرق بين الاثنين صغير، حيث إن GDP ناقص المدخول من الناتج القومي الذي يتحقق خارج البلد. المصدر:
Sam H. Schurr [et al.], *Energy in America's Future: The Choices Before Us,* (Baltimore Published for Resources for the Future by John Hopkins University Press, 1979).

3 عناصر الإنتاج تعني تلك السلع التي تستخدم لصنع سلع أخرى بما فيها العمالة ورأس المال والأرض والمواد الخام ومصادر الطاقة وكلها مدخلات في عملية الإنتاج.

لو كان نمو الطلب في الحقيقة مرتبطاً أكثر بتغير السعر من الدخل، فطبقاً لنظرية نموذج السوق الأساسية، فإن ارتفاع الأسعار يؤدي أو يجب أن يؤدي إلى انخفاض الاستهلاك من دون حاجة إلى هبوط الناتج المحلي الكلي. لكن عندما بدأت أسعار الطاقة ترتفع في أوائل السبعينيات – من خلال القفزات في أسعار النفط ومن ارتفاع أسعار الكهرباء – بدا أن سوق الطاقة كانت مختلة[4]، وأن المتشائمين كانوا على صواب. لقد هبط الطلب على الطاقة على وجه التأكيد، فاستهلاك الطاقة للفرد في الولايات المتحدة مقاساً بالوحدات الحرارية البريطانية BTU (انظر المحلق أ) انهار من 350 مليون BTU عام 1973 (وهي السنة التي حدثت فيها صدمات النفط) إلى 340 مليون BTU عام 1974 ثم إلى 327 مليون BTU عام 1975، كما هبط الاستهلاك الكلي من 74.3 كوادريليون (10^{15}) BTU أو 74.3 كواد إلى 70.5 كواد (انظر الجدول 1.4). لكن الناتج المحلي الكلي هبط كذلك وعانى اقتصاد الولايات المتحدة كساداً شديداً. وهذا ما أوحى بأن نمو الناتج المحلي الكلي واستخدام الطاقة لم يرتبطا بطريقة بسيطة بل إنهما ارتبطا عرضياً. فالهبوط في استخدام الطاقة لم يكن مجرد علامة لتباطؤ الاقتصاد. وبالأحرى فإن ارتفاع أسعار الطاقة أدى إلى هبوط في الطلب والذي بدوره بدا كسبب للركود – الذي استمر حتى جرى امتصاص ارتفاع أسعار الطاقة خلال ارتفاع عام في مستوى الأسعار (تضخم). وقد استأنف الناتج المحلي الكلي على وجه التأكيد ارتفاعه عام 1976 وكذلك استهلاك الفرد (والاستهلاك الكلي) للطاقة. وهذا ما دعم الاعتقاد في الارتباط العَرَضي بين استخدام الطاقة والنمو الاقتصادي. ومع استئناف نمو استخدام الطاقة حفز الخوف من عجز مستقبلي أو استنزاف للموارد النادرة البعض في الجدل بأن الأميركيين بحاجة إلى أن يتقبلوا انخفاضاً طوعياً في مستوى حياتهم للحفاظ على موارد العالم وحمايتها.

عندما حلَّقت الأسعار ثانية في نهاية السبعينيات مقارنة بما كانت عليه في بداية العقد لم يوفِّر السوق ثانية أي تأثير ملطف. حتى الصدمات السعرية في الحقيقة لم تقلل الطلب في البدء. وبدل من ذلك ارتفع الاستهلاك وكذلك الناتج المحلي الإجمالي. ولأن الطاقة كانت عاملاً في كافة أنواع الإنتاج الحديثة حصلت زيادة عامة في مستوى الأسعار. وبعبارة أخرى عرض سوق الطاقة طلباً غير مرن تقريباً وجرى

4 عندما لا يتجاوب سوق لسلعة ما للسعر أو لتغيرات أخرى كما يتوقع ذلك نموذج السوق فيقال إنه يظهر (اختلالات). والحقيقة أن الأسواق التي لا تؤدي تطورات العرض والطلب فيها إلى السعر الصحيح وإلى أحسن التخصيصات تعتبر فاشلة.

امتصاص الصدمات السعرية من خلال أسعار أعلى للمنتوج. وكان استهلاك الفرد للطاقة في عام 1979 قد ارتفع إلى 351 مليون BTU وارتفع الطلب القومي الكلي بنسبة 12 في المئة مقارنة بمستويات 1975 إلى 78.9 كواد (الجدول 1.4). ونما الاستهلاك الكلي حتى أكثر من ذلك عام 1980 ثم هبط.

في هذا الوقت بلغ التشاؤم حول استهلاك الطاقة في المستقبل أوجه. فقد توقعت الدراسات التي أجريت في أواسط السبعينيات وحتى أواخرها من قبل خبراء مختلفين ومن مختلف المنظمات العامة والخاصة (الجدول 2.4) بوجود طلب متزايد باستمرار في المستقبل. وقد توقع أغلبية المتوقعين بدءاً بدراسة وزارة الداخلية عام 1972 أن تزداد متطلبات الطاقة في الولايات المتحدة لتصل إلى ما بين 80 و100 كواد في عام 1980 وترتفع إلى 116 كواد في عام 1985. وكما يبين الجدول لعام 2000 فقد تراوحت التقديرات مع استثنائين – من 93 وإلى 196 كواد – والرقم الثاني يعني أن الاستهلاك السنوي سيتضاعف ثلاث مرات تقريباً خلال الربع الأخير من القرن*.

وقد جعل الركود الاقتصادي في الولايات المتحدة في عام 1980 وعام 1982 النهاية الأعلى لتقديرات 1985 غير محتملة قبل أن يسجل الحساب الأخير. وهبطت متطلبات الطاقة كما توقع الناس مع هبوط الناتج المحلي الكلي. وقد بدا واضحاً في أواسط الثمانينيات أن معظم التقديرات كانت بعيدة عن الواقع ليس بسبب الركود وحسب، بل لأنها كانت في الأساس مغلوطة.

فقد أخذ المخمنون بحسب ما يظهر بفكرة عدم مرونة منحنى الطلب للطاقة والسبب الأهم لذلك كما يبدو استند إلى منطق مغروس في السيكولوجيا أكثر مما في الاقتصاد. وتبعاً لهذا الرأي كان مفتاح تقليل الطلب تغيُّر سيكولوجي في توجهاتنا وأساليب حياتنا نحو الرغبة لتبرير الأمر بما هو أقل. ومع ذلك فقد افترض أننا سوف لا نبدِّل سلوكنا بسبب كلفة الطاقة وحسب: أي أن نركب سيارات أصغر وأن نقلل التدفئة شتاء والتكييف صيفاً، أو أن نغير أساليب حياتنا بأي نمط آخر. والحقيقة كانت هناك إشارات قليلة في نهاية السبعينيات على تقبل الأميركيين القيام بمثل هذه التغيرات.

* بلغ الرقم سنة 2000 فعلياً 98.97 كواد BTU بما فيها استيراد الكهرباء ولم يتجاوز 99.30 كواد سنة 2008. المصدر /e.io.doe.qov/emeu/aer/contents.htm بينما الناتج المحلي الكلي (بدولارات 1987 مثل جدول 1.4) 6482 مليار سنة 2000 ليزداد إلى 7933 مليار سنة 2008 (المصدر bee. Gov/national/xle/gdplev.x/s) أي إن الناتج المحلي الكلي ازداد منذ سنة 1987 بنسبة 85 في المئة بينما لم يزدد استهلاك الطاقة إلا بنسبة 34 في المئة.

لكن أسعار الطاقة كان لها تأثير أصبح أكثر وضوحاً مع مرور الوقت. وكان هناك في الحقيقة بعض الأدلة على تأثير آلية السعر منذ أواسط السبعينيات. ومع أن الاستخدام الكلي والاستخدام للفرد الواحد كانا يزدادان كانت هناك إشارة واحدة إلى كوننا نستخدم الطاقة بطريقة أكثر كفاءة. ورغم أن الاستهلاك ازداد بين عامي 1975 و1979 (بمقدار 12 في المئة) إلا أن الاستهلاك للدولار الواحد من المنتوج كان قد انخفض (بمقدار 5 في المئة إلى ما هو أقل من BTU 20000 للدولار من الناتج المحلي الكلي)، أي إننا كنا ننتج كمية أكبر بطاقة أقل.

الجدول 1.4: الناتج المحلي الكلي والسكان واستهلاك الطاقة كل سنتين خلال الفترة 1973 – 1993 في الولايات المتحدة

العام	GDP (مليارات الدولارات عام 1987)	السكان	استهلاك الطاقة (أ) الكلي	للدولار GDP	للشخص
1973	3268.6	211.4	74.28	22.73	351
1975	3221.7	215.5	70.55	21.90	327
1977	3533.3	219.8	76.29	21.59	347
1979	3796.8	224.6	78.90	20.78	351
1981	3843.1	229.6	74.00	19.25	322
1983	3906.6	234.3	70.52	18.84	301
1985	4279.8	238.7	73.98	17.29	310
1987	4539.9	243.4	76.89	16.97	316
1989	4838.0	248.2	81.33	16.81	328
1991	4861.4	252.1	81.12	16.69	322
1993	5173.7	257.9	83.96	16.34	326

(أ) الاستهلاك الكلي للطاقة بكوادريليون BTU (أي 10^{15}). الاستهلاك بدولار 1987 من الناتج المحلي الكلي بآلاف BTU والاستهلاك للشخص بملايين BTU. ملاحظة: قد لا يكون المجموع الكلي متساوياً لحاصل جمع المكونات لاستخدام التقريب.

المصدر: Energy Information AdministrationAnnual Energy Review Washington D.C. 1993.

والحقيقة أن الأرقام أوحت بكفاءة أكبر في استخدام للطاقة، فمن المفهوم أن المتوقعين لم يجدوا ذلك بالضرورة برهاناً على اتجاه محدد. وكان بإمكان تحسينات أكبر في نسبة دولار/ الناتج المحلي الكلي في الواقع أن تشير – وقد أشارت بصورة جزئية – إلى انتقال من اقتصاد صناعي كثيف الاستخدام للطاقة إلى اقتصاد أكثر توجهاً نحو الخدمات. وكانت الأدلة التاريخية أيضاً غامضة على الأقل. ورغم أن مدخولات الطاقة لكل دولار من الناتج المحلي الكلي انخفضت في بعض السنين بعد الحرب العالمية الثانية (ومع ذلك لم تكن بالسرعة المطلوبة لتغيير النهج الجامد لنسبة الناتج المحلي الكلي/ طلب الطاقة). ومع الستينيات كنا نستخدم بوضوح طاقة أكثر لكل دولار من المنتوج. إضافة إلى ذلك وحتى إذا كان هناك تحرك جديد من نوع ما نحو الكفاءة في السبعينيات، فإنه كان متخلفاً وراء النمو في الطلب وبدا كعامل تحفظ في أحسن الأحوال وليس كابحاً للنمو على الطلب.

الجدول 2.4: توقعات حول الاستخدام الكلي للطاقة في الولايات المتحدة للأعوام 1985,1980، 2000، 2010 (كوادريليون BTUs)

الجهة التي أعدت الدراسة	1980	1985	2000	2010
لاندزبيرغ وزملاؤه (1963)	79.19	135.6	89.23	135.6
وزارة الداخلية الأميركية (1972)	96.00	191.90	116.60	191.90
وزارة الداخلية الأميركية (1975)	163.40	103.50	163.40	–
مؤسسة فورد. مشروع سياسة الطاقة (1974)				
النمو التاريخي	100.00	187.00	115.00	187.00
الحل التكنولوجي	88.00	123.00	92.00	123.00
النمو الصفري في الطاقة	85.13	100.00	88.00	100.00
الطبعة الأولى لمشروع الاستقلال (1974)				
القضية الأساس	86.30	147.00	102.92	147.00
التحول	82.20	120.00	94.16	120.00
الولايات المتحدة مؤسسة الطاقة القومية (1976)				
نمو منخفض	80.23	90.72	–	–
نمو عال	85.40	105.64	–	–
الأمم المتحدة (1976)				
الحالة المرجعية	86.50	102.90	–	–
معهد أديسون الكهربائي 1976				

يتبع...

تابع...

نمو معتدل	–	–	161.00	161.00
معهد تحليل الطاقة 1966				
نمو منخفض	–	–	101.40	–
نمو عال	–	–	–	125.90
خطة الطاقة القومية 1977	–	97.00	–	–
معهد ستانفورد للبحوث 1977				
حالة الأساس	–	–	143.20	–
نمو منخفض	–	–	109.40	–
معهد بحوث الطاقة الكهربائية 1977				
حالة عالية	–	–	196.00	–
حالة حفاظية	–	–	146.00	–
مشغل عن استراتيجيات الطاقة البديلة (1977)				
نمو منخفض	–	–	115.10	–
نمو عال	–	–	132.00	–
مختبر بروكهافن القومي/ شراكة ديل جورغنسن (1978)				
حالة أساس	–	–	138.50	–
معهد البحوث الوطني/ أكاديمية العلوم الوطنية (1979)				
نمو منخفض	–	69.25	66.73	65.10
نمو عال	–	94.29	144.28	191.60
موارد للمستقبل (1979)				
نمو منخفض	–	80.52	95.00	–
نمو عال	–	89.50	145.00	–
تقرير 2000 الكوني للرئيس (1980)				
نمو منخفض	–	90.00	129.70	–
نمو عال		102.00	141.30	–
روس ووليامز (1981)				
نمو منخفض	–	73.04	67.83	64.00
العمل وكالمعتاد	–	80.09	93.00	102.00
الاستهلاك الفعلي	76.20	74.00	–*	–

* الاستهلاك الحقيقي لعام 1993 كان 83.96 كوادريليون

المصدر: مقتبس من (1982) Le Bell. (المؤلف).

إنما كان هناك في الواقع اتجاه جديد نحو كفاءة استخدام الطاقة في اقتصاد الولايات المتحدة، وقد أصبحت واضحة بصورة متزايدة (والعلامة المميزة لذلك هي كفاءة استخدام الوقود المتزايدة للسيارات) خلال النصف الأول من الثمانينيات. وانخفضت نسبة استهلاك الطاقة لكل دولار من الناتج المحلي الكلي 21 في المئة من 1975 لغاية 1985. وكان الانخفاض مستمراً طوال كل سنين الفترة واستمر بالانخفاض في التسعينيات. ولم يصل استهلاك الطاقة الكلي ذروته التي بلغها عام 1979 والتي كانت 78.9 كواد خلال نصف العقد التالي، وكان الاستهلاك الكلي للطاقة عام 1985 لا يزال أقل مما كان عليه عام 1979 بنسبة 6 في المئة حتى إنه كان أقل بقليل مما كان عليه عام 1973 (الجدول 1.4). وأخيراً جرى تجاوز رقم عام 1979 في عام 1988. ومع حلول عام 1993 كان الاستهلاك الكلي لايزال أعلى من مستوى عام 1979 بنسبة 6 في المئة فقط. أما استهلاك الطاقة للفرد الواحد فقد هبط من مستوى الذروة له عام 1978 بنسبة 12 في المئة تقريباً وكان أقل مما كان عليه عام 1975 بنسبة 5 في المئة. في الوقت ذاته ارتفع إجمالي الناتج المحلي (بالدولارات الحقيقية أو الثابتة) بنسبة 33 في المئة منذ عام 1975 لغاية 1985. وكانت الصلة قد فُصِمَت بين النمو واستهلاك الطاقة والناتج المحلي الكلي.

لماذا أخطأ المتوقعون؟ أحد الأسباب الرئيسة كان التقدير دون الواقعي لأثر الأسعار على سوق الطاقة. ويمكن بناء قضية قوية (وقد جرى ذلك بصورة خاصة من قبل الاقتصادي (William Hogan in: Sawhill and Cotton, 1986) تقول إن سوق الطاقة يتجاوب بنمط يتماشى مع نموذج السوق الكلاسيكي. ولم يكن هذا ظاهراً دوماً بسبب عدم إعطاء وزن كاف لأهمية الزمن في تنظيم السوق. والنقطة الحرجة في سوق الطاقة هي أن أي تعديلات – تعديلات في الطلب – تحصل عبر فترة طويلة. وقد تتأخر بفترة بعد تبدل الأسعار واقعياً وقد تبدو السوق في البداية غير مستجيب به لتغير الأسعار خلافاً لافتراضات النموذج الاقتصادي.

إن هذه الحجج إضافة إلى ملاءمتها للتاريخ الحديث منطقية. فمدخولات الطاقة كما لاحظنا ضرورية لجزء كبير من الحياة في المجتمع الصناعي. لكن الطاقة تستهلك بدرجة رئيسة بواسطة ماكينات مجتمعنا – وهي سلع غالية نسبياً وطويلة العمر في معظمها (أدوات منزلية، معدات مصنعية، وسيارات وما إلى ذلك). ولكي نكسب

كفاءة أكبر في استخدام الطاقة في الاقتصاد علينا استبدال الماكينات. إنما هل يوجد محفز بدرجة كافية لاستبدالها حتى في حالة زيادة كبيرة في كلف الطاقة؟ الإجابة على المدى القصير هي سلبية.

دعنا ننظر في تأثير ارتفاع 10 في المئة في كلفة الطاقة بصورة حقيقية. هناك في معظم الحالات إجراءات قصيرة المدى يمكن للناس تبنيها – قبل الاستغناء كلياً – والتي فيها إحساس اقتصادي. ربما يكون هناك عدد قليل من إجراءات إدارة الخدمات متوافرة للأفراد والأعمال التجارية. فالأفراد مثلاً يمكن أن يؤكدوا إطفاء الأنوار كلما تركوا الغرفة، ويستطيعون من دون عناء استبدال مصابيح قوة 75 واط بأخرى قوتها 60 واط. لكن الكسب الأكبر في الكفاءة يستند إلى الاستثمار ويحتاج إلى صرف مبالغ لمعدات جديدة أو لإعادة تجهيز أو إصلاح معدات قديمة. وكلفة تحويل المعدات الجديدة (وحتى كلف الإصلاح أحياناً) مكلفة بدرجة أكبر بكثير من أي توفير متوقع في كلفة الطاقة. وقد بينت دراسة في الصناعة أوائل الثمانينيات مثلاً أن الطاقة تشكل ما معدله 4 في المئة من عوامل كلف الإنتاج. وبذلك تعني زيادة تبلغ 10 في المئة في كلفة الطاقة زيادة تبلغ 0.4 في المئة فقط في كلفة الوحدة المنتجة. في حين أن مصنعاً جديداً أو حتى ماكينة جديدة يمكن أن تكلف ملايين الدولارات مع كلف استدانة تمثل عبئاً أثقل بكثير بالنسبة إلى المصلحة من زيادة في كلفة الطاقة. ففي صناعة الصلب مثلاً قال أحد الاقتصاديين إن كلفة مصهر جديد كانت «مذهلة» (نقلها Peck and Begg, in: Sawhill and Cotton, 1986). إذ من الأسهل والأقل كلفة للمصنع أن يرفع سعره بدرجة قليلة على المدى القريب لتغطية الكلفة الزائدة. لذا، فإن الأسعار تزداد في حين يبقى الطلب على الطاقة ثابتاً – ما يعطي انطباعاً عن عدم مرونة المنحنى. والأشخاص بحد ذاتهم لا يملكون إلا قليلاً من التحفيز ليصرفوا عدة مئات من الدولارات شهرياً على سيارات جديدة ليوفِّروا بضعة دولارات عند مضخة البنزين كل شهر[5]. ومع ذلك فإن المنظور البعيد يمثل صورة مختلفة. فإذا ما ارتفعت أسعار

5 يمكن أحياناً للمستهلك المتوسط أن يحصل على توفير في الطاقة من خلال شراء معدات رأسمالية جديدة – شراء يدفع كلفته في الحقيقة عبر عدة سنوات من خلال توفير في كلفة الطاقة. وهذا ما يحتاج إلى تثقيف جماهيري لأن الفرد لن يقوم بالشراء إذا ما كان غير مدرك لمردوده ويرى الكلفة الرأسمالية فقط. لكن المستهلكين كانوا في بعض الأحيان يقاومون شراء معدات رأسمالية جديدة حتى عندما أعلموا بالمردود. وقد حاول البعض أن يبرهن على أن هذا يمثل فشلاً في السوق لأن الناس كما يبدو يقاومون تقبل ما يبدو أنه مردود جيد على الاستثمار. وفي الوقت نفسه قد يكون =

الطاقة (ويتوقع ارتفاعها أكثر) فسيكون هناك حافز للمستهلكين التجاريين والأفراد لشراء سلع معمرة أكثر توفيراً للطاقة عندما يستبدلونها – كما يفعلون مع مرور الزمن. وربما لن يكون لديهم خيار في الحقيقة غير شراء كفاءة وقود أعلى لأن التنافس بالنسبة إلى مصنع المعدات المعمرة يجعله يبني معدات جديدة. وكلما ارتفعت أسعار الطاقة ستجعل الطلب أشد على الكفاءة في المعدات المعمرة الجديدة. ونتيجة لهذا النمط يهبط الطلب على الطاقة عبر الوقت لكل دولار من الناتج المحلي الكلي. والحقيقة أن هذا التأثير المتأخر يجب أن يستمر حتى إذا استقرت أسعار الطاقة أو انخفضت.

وقد بين هوغان عام 1982 كيفية عمل طريقة التعديل من خلال النظر إلى المعطيات من عام 1960 لغاية 1982. ووجد أن مرونة الطلب على الطاقة تقارب الوحدة وذلك من خلال استخدام نسب تعديل مرتبطة بنسب الاندثار للمعدات الرأسمالية[6] تتباين بين 10 و20 في المئة سنوياً. وبعبارة أخرى إذا تضاعف مجموع كلف الطاقة وبقيت كافة المتغيرات الأخرى ثابتة فإن الطلب بعد عدة سنوات (استخدم هوغان بين 6 و12 سنة) سينخفض إلى النصف.

وإذا ما كان تحليل هوغان صحيحاً فإن الصدمات السعرية لنهاية السبعينيات عند الزمن الذي قدم اقتراحه فيه كانت بحاجة إلى وقت لتأخذ تأثيرها الكامل. وكان قد توقع ذلك محاولاً أن يبرهن أن أسعار الطاقة حتى لو استقرت فسوف لا تتنافى مع استمرار مكاسب الكفاءة. وقد تحقق التوقع إذ إن استهلاك الطاقة بين عامي 1984 و1986 كان ثابتاً في أساسه، في حين أن استهلاك الفرد الواحد والاستهلاك مقابل الناتج المحلي الكلي انخفضا في الولايات المتحدة. وفي الوقت ذاته ارتفع الناتج

= هذا المستهلك يتصرف بطريقة عقلانية عندما نعتبر أن المردود يفترض تقديراً للسعر المستقبلي للطاقة. وللجمهور الحق مع عدم إمكانية التوقع بسعر الطاقة كما حدث في السبعينيات وأوائل الثمانينيات أن يكون حذراً في تقبل تقديرات كهذه وبخاصة عندما تتجاوز مدتها سنة أو سنتين مستقبلياً (انظر الفصل العاشر).

6 نعني بنسبة التعديل (Rate of adjustment) النسبة في السنة التي يتغير بموجبها الطلب على الطاقة نسبة إلى التغير في السعر كنسبة مئوية نحو تعديل كامل عند الاقتراب من قيمة المرونة البالغة واحد. أما نسبة الاندثار (Depreciation rate) فتشير إلى النسبة المئوية لانخفاض قيمة رأس المال سنوياً. وبعبارة أخرى يفترض أن البلى والاستهلاك ينقصان من قيمة الماكنات والبنايات إلى حد لا تعمل فيه أو أن قيمتها تصبح صفرية. ويفترض أن الماكنات والبنايات لها نسب اندثار مستقرة (لكنها مختلفة اعتماداً على نوع الماكنة أو البناية). ومما لا يمكن تجنبه أن بعض الماكنات ستندثر فعلاً أسرع من غيرها إلا أنه من المفيد تحديد التوقيت الذي يجب فيه استبدال المعدات الرأسمالية.

المحلي الكلي بمقدار 6 في المئة. وبحلول هذا الوقت كانت أسعار الطاقة بالدولار الحقيقي تنخفض بصورة واضحة (الجدول 3.4). وكان يتوقع من انخفاض الأسعار بالطبع التشجيع على زيادة الاستهلاك، وبدأت تظهر إشارات على ذلك أيضاً. فاستهلاك النفط الذي كان يتناقص باستمرار بين عامي 1979 و1983 عندما كانت

الجدول 3.4: مؤشر أسعار الطاقة 1973 – 1991 الاسمية والفعلية

(معدلة بموجب التضخم)

العام	الاسمي (1987 = 100)	الفعلي (1987=100)
1973	32.1	76.1
1974	44.4	95.7
1975	50.2	98.9
1976	53.5	99.8
1977	59.0	102.7
1978	62.4	101.9
1979	76.9	115.5
1980	100.7	136.8
1981	116.3	145.0
1982	119.8	141.3
1983	116.6	132.8
1984	116.0	127.7
1985	115.8	123.3
1986	100.1	103.6
1987	100.0	100.0
1988	99.3	95.5
1989	104.3	96.1
1990	113.4	99.8
1991	112.1	95.1

ملاحظة: مؤشر أسعار الطاقة الاسمي هو قياس معدل في نهاية السنة لأسعار الطاقة. أما المؤشر الفعلي فهو المؤشر الاسمي مضروباً في مؤشر أسعار الشراء المحلية المعدل بحسب ما تنشره وزارة التجارة.

المصدر: Energy information Adminstration, Annual Energy Review, Washington.Dc1993.

الأسعار تتصاعد بدأ بدوره يتصاعد عام 1984 واستمر خلال عامي 1985 و1986 مع هبوط الأسعار. وبعبارة أخرى، إن آلية الأسعار في أواسط الثمانينيات بدت وكأنها تعمل في الاتجاهين في الوقت ذاته، إذ كانت الارتفاعات السعرية السابقة تؤدي إلى كفاءة أكبر، لكن هبوط الأسعار كان قد بدأ يشجع توسعاً في الطلب. وهذا ما يتوقعه المرء باستخدام مفهوم هوغان.

وما كان متلازماً مع الخطأ في التحليل الاقتصادي الذي اعتبر النمو في الناتج المحلي الكلي واستهلاك الطاقة بنسبة ثابتة كان على الأقل افتراضاً تقنياً ضمنياً ـ على الدرجة نفسها من الخطأ ـ يقول إن كفاءة استهلاك الطاقة المؤثرة في الكلفة ستنجم عن الابتكار التكنولوجي. وهناك كما سيجري بحثه في الملحق (أ) حدود نظرية للكفاءة، فالماكينة الحرارية لا يمكنها أن تتعدى الكفاءة المثالية لدورة كارنو مثلاً. وكلما اقتربت التكنولوجيا من حدود الكفاءة بحسب كارنو قلت فرصة الحصول على تحسينات تؤثر في الكلفة. لكن التحسينات في الطلب على الطاقة البالغة 16 في المئة لكل دولار من الناتج المحلي الكلي في الولايات المتحدة والتحسينيات المشابهة في الأقطار المتطورة الأخرى[7]. خلال عقد الثمانينيات أوحت بقوة أن تحسنات ملموسة في الكفاءة كانت مرغوبة ومحتملة مع أخذ المحفزات السعرية بنظر الاعتبار. وهذا ما يوحي بدوره عدم وجود محددات تقنية مثالية قيد العمل، أي إن الكسب كان بسبب سلوك الناس الاقتصادي ضمن المدى الممكن تقنياً.

لكن ماذا عن المستقبل؟ هل هناك كفاءة أكثر يمكن كسبها وإذا كان كذلك فما هو مقدارها؟ وهل يمكن الاعتماد على السوق لإيصالنا هناك؟

الدرس السويدي المختلط

غالباً ما يشير نقاد نمط الاستهلاك في الولايات المتحدة عندما ينظرون في كمية الطاقة التي يحتاج إليها المجتمع الصناعي إلى المثال السويدي. فقد بدا السويديون

7 خلال الفترة من عام 1980 لغاية عام 1984 ارتفع الناتج المحلي الإجمالي لكافة الأقطار الصناعية الرئيسة كل سنة – وبمعدل 2.2 في المئة سنوياً. وهبط الطلب على الطاقة في مجموعه بنسبة 1 في المئة سنوياً. كذلك تناقصت كمية الطاقة لوحدة الإنتاج بنسبة 3 في المئة سنوياً (المصدر: The World Bank and International Monetary Fund, 1980 – 1985).

خلال عقد السبعينيات نموذجاً لشعب كفؤ الاستخدام للطاقة فيما صور الأميركيون على كونهم يهدرون الطاقة. وسجلت السويد عام 1980 دخلاً للفرد تجاوز دخل الفرد الأميركي. وكان لديها اقتصاد صناعي، والمصادر التي سمحت لشعبها التمتع بحياة لا تختلف عن حياة الأميركيين. ورغم ذلك، فإن السويديين كانوا يستهلكون على أساس الفرد أقل من الأميركيين بنحو الثلث. وفي النظر إلى هذه الأرقام يصعب على المرء أن لا يتفق بصورة كاملة مع النقاد.

وبدا أن السويد ولأسباب أخرى توفِّر مقارنة جيدة. فالأمر لا يقتصر على امتلاك السويد لقطاع صناعي ثقيل كثيف الاستخدام للطاقة، بل إنها تواجه مناخاً يحتاج إلى مصروف كبير للطاقة لفصل واحد على الأقل، ورغم أن السويديين ليسوا متكيفين قدر نظرائهم الأميركيين مع السيارة إلا أن معظمهم يمتلكون سيارات.

وأعطى الفرق الكبير على الأقل الناس في الولايات المتحدة سبباً للتساؤل عن الافتراضات القديمة حول إمكانية الكسب في كفاءة الطاقة ضمن بيئة ينمو فيها الاقتصاد. ويجب على أي حال، وكما لاحظنا سابقاً، أن ننظر إلى هذه المقارنات ببعض الحذر والشك.

فالحالة السويدية في الحقيقة تثير بعض الأسئلة المهمة. هناك أولاً سبب للاعتقاد بأن السويديين مثل الأميركيين يتفاعلون كما يتوقع مع سوق الطاقة لديهم. بالنسبة إلى وقود السيارات مثلاً، يستخدم السويديون كمية أقل وسبب ذلك جزئياً السعر الأعلى بكثير الذي يدفعونه وتأثير السياسات التدخلية الحكومية التي تضع ضرائب عالية على البنزين. وهذه الحقيقة يمكن أن تؤدي منطقياً إلى استنتاجين متضادين تماماً، إما أن التدخل الحكومي جيد لأن الأسعار العالية تبقى الطلب منخفضاً، أو أن التدخل الحكومي لا قيمة له على المدى الطويل لأن الطلب سينخفض على أي حال عندما ترتفع الأسعار كما يتوقع عبر الزمن. وقد تكون هناك بالطبع عوامل أخرى تحفز سياسات الطاقة الحكومية مثل الرغبة لتقليل التلوث، لكن هذين الموقفين المتضادين لهما من يدافع عنهما، والمؤكد أن أياً من الاستنتاجين ممكن بالنظر إلى تأثيرات سياسات الطاقة على المستوى العالمي.

وهناك أيضاً فروقات عملية واجتماعية بين السويد والولايات المتحدة يجب عدم

التغافل عنها. فالولايات المتحدة بلد واسع الأرجاء بينما لا تزيد مساحة السويد على كاليفورنيا إلا قليلاً، كما إن مساحة الأقطار الاسكندنافية مجتمعة أقل من مساحة ألاسكا. وهذا لا يعني ببساطة أن الأميركيين يستخدمون سياراتهم لمسافات أطول. ويمكن أن يكون لها مترتبات مهمة على الصناعة أيضاً. فقد كانت صناعة الإسمنت السويدية عام 1976 أكفأ من قرينتها الأميركية في استخدام الطاقة بنحو 18 في المئة. فباستطاعة الأقطار الصغيرة بناء مصانع كبيرة وكفوءة ومركزية لتلبي حاجات الاقتصاد الوطني. أما في الولايات المتحدة فإن كلفة نقل الإسمنت تفوق قيمة أي كسب متأتٍ من التركيز. لذا فإن مصانع صغيرة محلية غير كفوءة هي الأفضل من ناحية الكلفة في الأسواق الإقليمية مقارنة بمصانع مركزية تقوم بالشحن عبر مسافات تبلغ 1000 ميل أو أكثر. والغريب في الأمر أن السياسة الحكومية مثل التي في السويد أبقت على أسعار وقود النقل عاليةً التي قد تزيد فعلاً في فائدة مصانع صغيرة غير كفوءة لأن كلفة الشحن ستكون عالية.

هناك أخيراً مسألة الذوق. فالأميركيون يفضلون السيارة الخاصة على النقل العام وقد يكون في ذلك هدر، فحتى السيارة الكفوءة في استخدام الوقود هي أقل من حافلة مملوءة بالركاب – لكن كيف تغير الذوق في محيط مجتمع حر؟ المسألة هي أن هناك اختلافات عميقة بين تشخيص المواقع الممكنة لتوفير الطاقة وإعداد إجابة لكيفية تحقيق هذا التوفير ـ فيما عدا الطرق القسرية.

إمكانية الحفاظ على الطاقة

نظرة عامة

لقد قمنا حتى الآن بمناقشة قضية تقليل الطلب على الطاقة من وجهة نظر زيادة الكفاءة: أي الإنتاج نفسه (أو إنتاج أكبر) بمدخول أقل للطاقة. والكفاءة الأكبر هي واحدة من طرق الحفاظ على الطاقة. وربما تكون الطريقة التي يفضلها أغلبية الأفراد لأنها توفِّر إمكانية طلب أقل ونمو مستمر للاقتصاد.

ويمكن أيضاً تعريف الحفاظ على الطاقة بثلاث طرق مختلفة، فهي يمكن أن تعني **أولاً** الاستبدال بأنواع أرخص من الوقود بدلاً من أنواع أخرى أغلى ثمناً – وهو تقليل لعامل الكلفة وليس لمجمل الوحدات الحرارية لوحدة الإنتاج النهائي. والأكثر أهمية لنا كأمّة، قدرتنا في الحفاظ على الطاقة من خلال استبدال أحد الموارد المحدودة

بآخر أكثر وفرة أو بمورد متجدد. فالتحول من الغاز الطبيعي لتسخين الماء إلى التسخين بالحرارة الشمسية (انظر الفصل 10) قد يعطي كمية الوحدات الحرارية المستهلكة نفسها أو حتى كمية أكبر لكنه يحافظ على موارد محدودة من الغاز الطبيعي. والحفاظ على الطاقة أخيراً قد يعني ببساطة استخدام ما هو أقل. وهذا قد يتضمن خفض مستوى المعيشة – كما يخشاه بعض النقاد ـ أو إنه قد يعني نمط حياة مختلفاً وحسب ـ تغير نوعي بدل تغير كمي ـ وربما نقوم كمجتمع بالتحول من الفعاليات كثيفة الاستخدام للطاقة ـ أكان ذلك في العمل أم في اللهو – إلى أخرى كثيفة الاستخدام للعمالة ونوجه الاقتصاد مثلاً بدرجة أكبر نحو الإنتاج الحرفي المتخصص (الذي تطور مجتمعنا منه) مبتعدين عن الإنتاج الكثيف الآلي. وربما لن تحدث هذه التغيرات من غير التثقيف أو غير فترة من عوز الطاقة حيث يتوقع الناس كميات أقل من الموارد وأقل منفذاً للمصادر الغزيرة للطاقة الرخيصة وذلك لأننا مجتمع حر ولأن مثل هذه التغيرات تتطلب تغيراً في السلوك والمواقف.

وتبقى هذه الإمكانات على أي حال تأملية. فمن الأسهل جداً في عالم السياسة العامة والأكثر تقبلاً من الناحية السياسية لحكومة مثل حكومتنا أن تركز على التأثير في سوق الطاقة بدل إملاء التغيرات في الاتجاهات وفي أساليب العيش. سنقوم نتيجة ذلك بتحديد بحثنا على إمكانية الحفاظ على الطاقة من خلال تحسين الكفاءة والاستبدال بين الموارد.

ويصعب في الحقيقة تقدير إمكانية الاستبدال كمياً وبخاصة أن الاستبدال في المستقبل يمكن أن يقع تحت تأثير تطورات التكنولوجيات البديلة مثل الطاقة الشمسية أو أنواع الوقود التركيبي (انظر الفصل العاشر). ويجب على أي حال أن نلاحظ أن كسباً قد جرى في التحول من النفط إلى البدائل. ففي التوليد الكهربائي مثلاً كانت المولدات التي تستخدم النفط مسؤولة عن توليد نحو 17 في المئة من كهرباء الولايات المتحدة عام 1977 لكن هذه النسبة تقلصت إلى 3.5 في المئة عام 1993. أما الفحم الوافر فقد كان من الناحية الأخرى يولد نحو 57 في المئة من تجهيزات الكهرباء في الولايات المتحدة عام 1993 ويمثل ذلك زيادة بنسبة 10 في المئة عن الحالة منذ أواسط السبعينيات[8]. وما زال هناك في عقد التسعينيات كثير من إمكانات

8 كان هذا التحول مسؤولاً في الأغلب عن تخفيض كلفة الطاقة لوحدة إنتاجها. ولم يقم بالضرورة بتقليل كمية الطاقة المستهلكة. فحرق الفحم قد يكون أرخص من حرق النفط لكن كمية الوحدات الحرارية المستهلكة لكل وحدة من المنتوج ستكون نفسها أو ربما أكثر.

الاستبدال المؤثرة من حيث الكلفة متوفرة للصناعة على وجه التخصيص.

وقد أُجري المزيد من البحوث لتقييم كمية الحفاظ من خلال تحسين كفاءة استخدام الطاقة في الولايات المتحدة وهو ما يمكن أن يمثل تخفيضاً فعلياً في مجموع الطاقة المستهلكة (أو من قبل الشخص الواحد). وتفترض هذه التحليلات عموماً استمرار اتجاهات زيادة السكان بالنسب الحالية وتحاول أن تأخذ في الحساب تأثير الاقتصاد النامي. وعلينا أن لا ننسى أن النمو السكاني سيحول منحني الطلب إلى اليمين حتى إذا بقي استهلاك الفرد الواحد ثابتاً. كما أن نمو الدخل حتى إن لم يكن بتلك القوة في التأثير في الطلب، كما كان الناس يعتقدون ذات مرة، إلا أنه في أغلب الاحتمالات يلعب بعض الدور، لذا فإن زيادة الناتج المحلي الكلي سينتج منها بعض التأثير في الطلب على الطاقة.

ويبين الشكل 2.4 اثنين من هذه التحليلات المتعلقة بإمكانات الحفاظ على الطاقة. سيناريو نمو منخفض للأكاديمية الوطنية للعلوم (1979) والتحليل الذي أجراه روس وويليامز (1981). ويبين كلا التحليلين أن استهلاك الطاقة الكلي اتجه إلى الانخفاض عام 2000 (وربما لن يكون ذلك في المثال عند هذه النقطة) وسيزيد أكثر مع حلول عام 2010 (وهو اقتراح أكثر احتمالية)[9].

وتعد تقديرات روس وويليامز مشوّقة، **أولاً** لأن تقديرهما الأولي لعام 1985 الذي وضع قبل أربع سنوات برهن قربه الاستثنائي من الرقم الحقيقي وكانت تكهناتهما تقل بكواد واحد فقط عن مجموع 74 كواد. والشيء **الثاني** هو أنهما اعتقدا أن تقديراتهما لاستهلاك الطاقة يمكن أن يتحقق مع النمو الاقتصادي المقارب للمعدل التاريخي في الولايات المتحدة والبالغ 2.7 في المئة سنوياً. أما مركز البحوث الوطنية فقد ارتأى من ناحية أخرى تقلصاً في استهلاك الطاقة ضمن منظور نمو اقتصادي أبطأ.

---

9 جرى وضع السيناريوهات في الجدول 2.4 بين عامي 1963 و1981. وتباينت تقديرات متطلبات الطاقة خلال تلك الفترة بصورة كبيرة جداً كما يتبين من الجدول. لكن الاختلاف في التقدير لم يكن بهذه الحدة بعد إعادة استقرار سوق النفط العالمية في بداية الثمانينيات. وتتوقع هذه التقديرات بنسب زيادة أقل بكثير نتيجة للسياسة الحفاظية التي اتبعت خلال فترة الأزمة. وفي حين سببت المؤشرات نحو استهلاك متزايد على المدى القصير في نهاية الثمانينيات قلقاً، لا يبدو وجود توجه نحو نسب زيادة في الطلب على الطاقة تماثل تلك التي كانت سائدة ما قبل الأزمة.

الجدول 4.4: استهلاك الطاقة من قبل القطاعات المختلفة في الولايات المتحدة (كوادريليون BTUs)

العام	السكنى/ التجاري	الصناعي	النقل	المجموع
1973	24.1	31.5	18.6	74.3
1975	23.9	28.4	18.2	70.6
1977	25.4	31.1	19.8	76.3
1979	25.8	32.6	20.5	78.9
1981	25.2	29.3	19.5	74.0
1983	25.6	25.8	19.1	70.5
1985	26.8	27.0	20.1	74.0
1987	27.6	27.8	21.5	76.9
1989	29.4	29.4	22.6	81.3
1991	29.4	29.6	22.1	81.1
1993(P)	30.3	30.8	22.8	84.0

ملاحظات: هناك نحو 3.0 كوادريليون BTUs من الاستهلاك من مصادر الطاقة المتجددة غير مشمولة. إلا أن 3 كواد إضافي من الموارد المتجددة المستخدمة في التوليد الكهربائي مدرجة في الجدول. وقد لا يكون المجموع مساوياً لمجموع المكونات بسبب التقريب والتدوير الرقمي (P) = مقدر.

المصدر: Energy Information, Annual Energy Review,Administration, 1993

يبدو مثل هذا الأداء ـ النمو والحفاظ على الطاقة ـ ممكناً من دون اختراقات تكنولوجية جديدة. وقد حاول البعض أن برهنة على أن مجال التوفير في الحقيقة أكبر. فحاولت دراسة لمعهد موارد العالم مثلاً أن تبرهن أن استهلاك الفرد الواحد في العالم الصناعي يمكن أن يخفض بنحو 50 في المئة (Goldemberg, Johansson, Reddy and Williams, 1987). ولكي يتم الوصول إلى هذا الهدف فربما يترتب على الولايات المتحدة ولديها واحد من أعلى مستويات الاستهلاك في العالم أن تخفض استهلاكها بنسبة مئوية أكبر مما يقترحه روس ووليامز.

ولكي تقيّم إمكانات الحفاظ على الطاقة من المفيد التمعن في استهلاك الطاقة في القطاعات الثلاثة ـ السكني/ التجاري. والصناعي والنقل ـ ومحاولة اكتشاف المواضيع التي يمكن تحقيق التوفير فيها (انظر الجدول 4.4). وسننظر بصورة رئيسة هنا في إمكانية الاستثمار في بقاء الطاقة، وسنتقصى ما يمكن انجازه بواسطة التكنولوجيا الحالية.

القطاع السكني/ التجاري

يشمل هذا القطاع كل من الدور التي تأوي عائلة واحدة أو أكثر من عائلة (أكثر من 100 مليون وحدة في الولايات المتحدة). كما يشمل قطاع الخدمات من الاقتصاد: المكاتب والمستشفيات والفنادق والمستودعات والمخازن. ورغم وجود اختلافات واضحة بين متطلبات الطاقة للقطاعين السكني والتجاري فإن استهلاكهما يدمج معاً لوجود بعض التشابهات المهمة. فنحو 60 في المئة من الطلب الكلي على الطاقة في القطاع السكني/ التجاري المدمج يستهلك في التدفئة. ويستهلكان معاً مقادير كبيرة من الطاقة للإنارة وتسخين الماء والتكييف والطبخ والتثليج (والاستخدامان الأخيران في خدمات الطعام التجارية والمؤسساتية إضافة إلى مطابخ البيوت). ويعمل التكييف والإنارة ومعظم المعدات الصغيرة على الكهرباء المنتجة في محطات توليد ذات مواقع مركزية. أما التدفئة وتسخين الماء فقد تكون بواسطة الكهرباء لكنها في الأغلب تجهز بواسطة الوقود مباشرة وعادة ما يكون أحد المشتقات النفطية أو الغاز الطبيعي أو البروبان أو البيوتان. وقد استخدم القطاع السكني/ التجاري بمجموعه نحو 30 كواد عام 1993 (انظر الجدول رقم 4.4).

وقد بذلت بعض الجهود نحو الحفاظ على الطاقة في القطاعات السكنية/ التجارية على أثر صدمات ارتفاع أسعار الطاقة وكذلك العجز في امدادات النفط والغاز في السبعينيات. وأخذت هذه الجهود في البدء هيئة استثمار صفرية ـ مثل إطفاء الإضاءة ـ أو طرق استغناء معتدلة ـ مثل تثبيت الحرارة عند 68° ف بدل 72° ف في الشتاء.

ووفَّر اضطراب أسواق الطاقة في السبعينيات حافزاً للانتشار الواسع للمعلومات إلى القطاع السكني/ التجاري عن بدائل الاستثمار. وكان هناك في القطاع بعض الحركة نحو الاستثمار في الوسائل الحفاظية. وكانت هناك على وجه التخصيص محاولة لتحسين العزل الحراري في البيوت والمباني بحيث يمكن أن تعمل تدفئة الفضاءات بكفاءة أكثر. واستثمر المستهلكون في مجموعة من الخيارات بدءاً بالتغليف رخيص الكلفة لمجاري الهواء ومنع تسربه وصولاً إلى الشبابيك ذات الطبقات الزجاجية الثلاث. وفي بعض الحالات قام الناس باستبدال أنظمة التدفئة ليستفيدوا من الكفاءة المحسنة. كما وفَّرت الأفران الجديدة في بداية الثمانينيات نحو

ثلث الطاقة لإنتاج القدر نفسه من التدفئة مقارنة بالنماذج السابقة. واستثمرت بعض المصالح في معدات أكثر تطوراً مثل التحكم الحاسوبي وأجهزة المراقبة القادرة على تنظيم الحرارة والنور في مجمعات المكاتب.

وكان الكسب في الكفاءة ملحوظاً في البيوت الجديدة. فبعض البيوت الجديدة المبنية في الثمانينيات كانت على المعدل أكفأ بنحو 50 في المئة لكل قدم مربع من المساحة مقارنة بالبيوت السابقة. لكن البيوت المصممة لتوفير الطاقة كانت على أي حال أكفأ بنحو 90 في المئة على المعدل. وفي حين كانت هذه المكاسب مؤثرة بحد ذاتها إلا أنها لم تعطِ أي هبوط دراماتيكي في استهلاك الطاقة في القطاع لأن التحول في البنايات القديمة في الولايات المتحدة بطيء جداً وسوف يكون هناك (وبصورة دائمة) عدد أكثر بكثير من الدُور القديمة مقارنة بالجديدة.

ومع ذلك فقد حجّمت هذه التطورات نمو الطلب في القطاع السكني/ التجاري – رغم التوسع الكبير في اقتصاد الخدمات والنمو المستمر في عدد السكان. فقد ازداد الاستهلاك في هذا القطاع بنسبة 27 في المئة فقط خلال الفترة بين عامي 1975 و1993، بينما ازداد الناتج المحلي الإجمالي بنحو 60 في المئة.

ورغم الكسب المتحقق في الثمانينيات إلا أن البعض حاول برهنة أن الحفظ السهل (المفترض أنه ذو كلفة صفرية واستثمار منخفض الكلفة) قد تحقق (Hirsch, 1987). لكن «السهل» هو اجتهاد نوعي لا يلقى دعماً شاملاً. إن السيناريوهات الحفاظية في الحقيقة تأخذ في المنظور توفيرات كبيرة في كافة القطاعات بما فيها السكنية/ التجارية. ويرى روس وويليامز في سيناريو النمو المنخفض أن حصة هذا القطاع من الاستهلاك الكلي ستهبط من 34 إلى 30 في المئة مع حلول عام 2000. ومن الواضح أنهم يعتقدون أن هذا القطاع يمكن أن يحقق حفاظية أكبر بكثير مما أنجز.

ويبدو أن الأنواع الريادية التي جرى اختبارها وبعض نماذج الإنتاج من التكنولوجيات المنزلية والتجارية تدعم هذا التحليل. وأهم كسب هو في مجال التدفئة الداخلية وبخاصة تدفئة البيوت التي تشكل أكثر من 50 في المئة من صنف التدفئة الداخلية. وكانت أغلبية التوفير في هذا المجال حتى الآن قد حصلت من العزل الحراري الأفضل. لكن التحسينات في العزل الحراري كانت في الأغلب غير نظامية

مثل قطع التسرب حول نافذة معرضة للتيارات الهوائية. ولم يصبح العزل الحراري أمراً شاملاً. وقد بينت التجارب أن الخبراء كانوا قادرين على الحصول على معدل توفير في الطاقة بحدود 30 في المئة للوحدة من خلال تحسين قشرة البيت فقط في البيوت القديمة. ووصل معدل الكسب إلى أكثر من 50 في المئة. عند استبدال الأفران القديمة بأخرى حديثة.

تعطي مثل هذه الجهود في ترقيع البنايات القديمة توفيراً هائلاً لكنها ليست ضرورية تبعاً لبعض اختصاصيي حفظ الطاقة بسبب التقنيات الجديدة. وقد جرت محاولة للبرهنة على أن استبدال كل شبابيك البيت بما يدعى الشبابيك الفائقة (Superwindows) سيؤدي إلى تخفيض كبير في الطلب على الوقود. وتقوم هذه الشبابيك مزدوجة التزجيج بعكس أشعة الحرارة تحت الحمراء معيدة إياها داخل البيت كما تحتوي على غاز الزينون العازل بين طبقتي الزجاج. لذا فهي أفضل من الشبابيك العادية ذات طبقة الزجاج الواحد في حفظ الحرارة بإحدى عشرة مرة (Rosenfeld & Hafemeister, 1988). وطبقاً لأحد التقديرات فإن استبدال كافة الشبابيك (في البلد) بشبابيك فائقة سيوفِّر نحو أربعة كواد من الطاقة سنوياً (Lovins and Lovins 1987).

إن كفاءة توفير الطاقة في البنايات الجديدة والتحسينات التي ستحصل في نهاية الأمر في القديمة (مثل الاستبدال الذي لا يمكن تجنبه للفرن القديم) قد تساعد على إبقاء نسبة النمو في الطلب على طاقة التدفئة الداخلية في القطاع السكني/ التجاري منخفضة لما تبقى من القرن. وفي الوقت ذاته لم توفِّر السوق مع أسعار الطاقة المنخفضة في نهاية الثمانينيات إلا القليل من المحفزات للمستهلك ليستفيد من تكنولوجيا حفظ الطاقة.

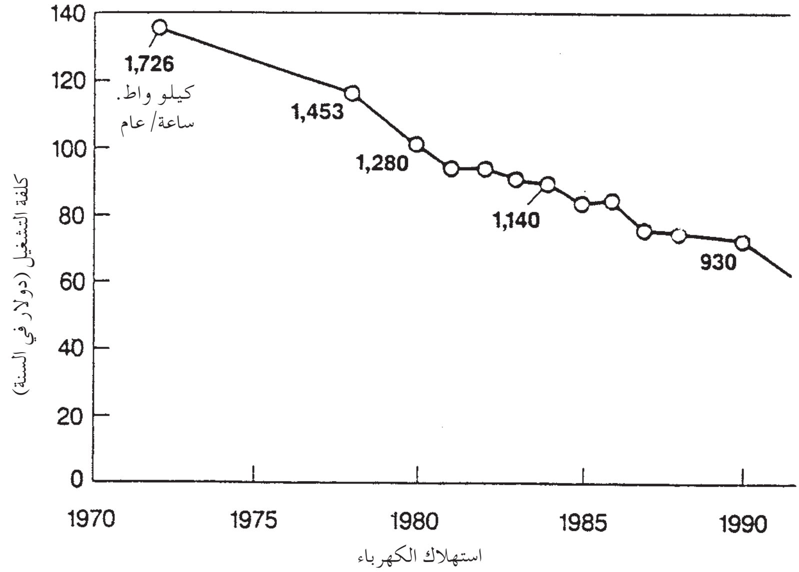
هناك أيضاً إمكانية لحفظ كبير للطاقة في أجزاء أخرى من القطاع السكني/ التجاري. وكان التوفير الحاصل في مصادر الطاقة الشحيحة غير مباشر بسبب كون معظم الطلب على الطاقة هو على الكهرباء (قد يكون تسخين الماء استثناء جزئياً وحيداً). فبمقدورنا قياس التوفير الممكن بالكواد – فالاستخدام المنزلي/ التجاري للكهرباء تطلب نحو 20 كواد من مصادر الوقود عام 1993 – رغم أن المقياس الأفضل في هذه الحالة قد يكون في مقدار سعة التوليد الكهربائية الجديدة الممكن تجنبها أو

السعة – القديمة التي يمكن إيقافها. والنقطة هي أن الكلفة الهائلة لبناء محطات توليد مركزية جديدة (انظر الفصل التاسع) لا تمثل الطلب المستقبلي على مصادر الطاقة وحسب، بل تمثل استنزافاً للموارد المالية التي يمكن استغلالها بطريقة أكثر إنتاجية في قطاعات اقتصادية أخرى[10].

إن بعض الحفاظ على الطاقة الكهربائية في هذا القطاع لن يكون من السهل تحقيقه بسبب أهمية العناصر غير الاقتصادية وبخاصة الذوق. فالتحول من المصابيح المتوهجة إلى مصابيح الفلورسنت مثلاً سيوفِّر الطاقة. فمصباح الفلورسنت قوة 11 واط المتوافر حالياً من النوع الذي يناسب مقاييس النور القياسية يعطي كمية النور نفسها الذي يعطيه مصباح متوهج قوة 60 واط، كما إن عمر مصباح الفلورسنت أطول بكثير. غير أن المستهلكين في الولايات المتحدة كانوا متلكئين في التحول وسبب ذلك جزئياً هو الذوق، فنور الفلورسنت غير مستساغ، ويبدو أن عامل الذوق يتجاوز العامل السِعري رغم أن تفهم قضية السعر ليس بتلك السهولة في هذه الحالة. فمصابيح الفلورسنت أغلى سعراً مقارنة بالمصابيح المتوهجة التي تعطي كمية الضوء نفسها في البداية، لكن مصابيح الفلورسنت تعتبر أقل كلفة لاستهلاكها القليل من الطاقة ولعمرها الطويل أيضاً. فالمستهلكون المعتادون على اتخاذ قرارات الصرف تبعاً للسعر الأولي لا يقدرون في الأغلب، أو لا يستطيعون تقدير مترتبات الكلفة الكلية من دون جهود مكرسة لتثقيفهم من قبل المصنعين أو الوكالات الحكومية. ومع ذلك لم يحدث في هذه الحالة على أي حال وحتى في بداية الثمانينيات عندما كانت المعلومات عن الكلفة الكلية منتشرة بصورة أوسع (بما في ذلك المعلومات عن الإنارة بالفلورسنت) لم يكن هناك هروب كبير من المصابيح المتوهجة مما أكد أهمية الذوق. وربما لن يحدث تحول في المستقبل ما لم ترتفع تسعيرة الكهرباء بصورة كبيرة أو أن تصبح مصابيح الفلورسنت أقل تميزاً عن المصابيح المتوهجة وهو أمر يجري تطويره: (انظر Goldemberg, [et al.] 1987).

ولا يتوقع في نواح أخرى أن يصبح الذوق عائقاً أمام سياسة الحفاظ. والثلاجات المنزلية التي تستهلك على مجال البلد نحو كواد من الطاقة الكهربائية سنوياً تشكل مثلاً ملحوظاً.

10 هناك مفهوم اقتصادي مهم يدعى كلفة الفرصة (Opportunity Cost). فكلما يجري إنتاج سلعة ما يتوقف جوهرياً إنتاج سلعة أخرى ربما كانت تنتج. لذا هناك كلفة فعلية للمجتمع كيفما جرى صرف الموارد.



الشكل 5.4 كلفة التشغيل السنوية واستهلاك الكهرباء لثلاجات جديدة في الولايات المتحدة مقتبسة من Gellings and Lovins Fickett, (انظر المراجع، الفصل التاسع).

وكما يبين الشكل 5.4 فإن معدل الطاقة المستخدمة لنموذج 1990 من الثلاجات المنزلية كان 930 كيلوواط – ساعة في السنة. لكن نماذج ريادية تستخدم 50 في المئة من الطاقة أو طاقة أقل من المعدل، وفي إحدى الحالات لم يتجاوز الاستهلاك ربع المعدل. وحتى النماذج القياسية الجديدة في السوق عام 1990 أظهرت تحسينات ملموسة في الكفاءة. إن استبدال كافة الثلاجات المنزلية بأكثر الأنواع كفاءة من إنتاج عام 1990 سيحسن الكفاءة بنحو 66 في المئة أو أكثر من 80 مليار كيلوواط – ساعة من الكهرباء. وهذا ما يعادل مخرجات ما يزيد على دزينة من محطات القدرة سعة 1000 ميغاواط (ميغاواط من السعة الكهربائية).

ورغم أن الثلاجات لن تُستبدل أو يُستغنى عنها، لكن ينبغي ألا يغيب عن البال أن بعض الكسب في الكفاءة يُتوقع أن يحدث. وربما تكون التحسينات في الكفاءة قد أضيفت إلى النماذج المنتجة بسبب الوعي المتزايد حول الطاقة في نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات. ومع تضاؤل المخاوف حول كلفة الطاقة سيكون هناك تحفيز أقل لجعل زيادة الكفاءة أولوية عليا لدى صنّاع الثلاجات. غير أن المقاييس التي فرضتها

الحكومة في هذه الحالة تتطلب كفاءة أكثر. والسؤال الرئيس الآن هو كم هو مقدار الكسب الإضافي الذي نستطيع توقعه. والحقيقة أن بإمكان مقاييس أشد صرامة تستخدم تكنولوجيا معروفة أن تقلل استهلاك الطاقة أكثر من 0.3 كواد للثلاجات وحدها.

ويمكن لتكنولوجيا الثلاجات أن توفِّر الطاقة بعدة طرق. ويجري الحفاظ على درجة حرارة ثابتة من خلال كابسة تعمل بالقوة الكهربائية ويعتمد مقدار الكهرباء المطلوب على تصميم الكابسة وموضع تركيبها كما يعتمد على عزل وحدة الثلاجة ذاتها (وبعبارة أخرى إذا ما كانت الثلاجة جيدة العزل فلا حاجة إلى اشتغال الكابسة كثيراً). ولا يتوقع أن توفِّر بقية المعدات المنزلية والمكتبية فرصة كبيرة للتحسينات، إلا أن هناك مجالاً كافياً في معظم الحالات لتحسين كفاءة استخدام الطاقة[11] بحيث يجعل الكسب الذي يراه الحفاظيون ممكناً.

قطاع النقل

يشمل قطاع النقل كل وسائط نقل الناس والبضائع – السكك الحديدية والنقل الجوي والحافلات والسيارات. وبلغ استهلاك هذا القطاع بكل أنواعه 22.8 كواد، أو حوالى 27 في المئة من الطلب الكلي عام 1993 (انظر الجدول 4.4). وكان الطلب على الطاقة في هذا القطاع يتجه إلى الارتفاع في القرن الماضي.

وتَستخدم معظم وسائل النقل في الولايات المتحدة نوعاً من محركات الاحتراق الداخلي وعادة ما تكون من نوع دورة – أوتو أو دورة – ديزل بينما تستخدم الطائرات النفاثة نوعاً من توربين الاحتراق (انظر الفصل الثالث). وكل الأنواع الثلاثة من مكائن الاحتراق الداخلي التي تستخدم طاقة المنتجات النفطية المكررة. وتستخدم مركبات دورة أوتو ودورة ديزل، وهي في المقام الأول شاحنات وسيارات

11 شرّع الكونغرس في الولايات المتحدة سنة 1988 تحسيناً يبلغ 25 في المئة في كفاءة الأجهزة المنزلية (وقام الرئيس ريغان برفض اللائحة لكنها أُقرت ثانية من قبل الكونغرس ووقعها الرئيس). وكانت اللائحة مصممة لتصحيح خلل في السوق إذ إن الأجهزة غير الكفوءة كانت لاتزال تباع لأن المشترين كانوا في الأغلب ليسوا المستخدمين. وكان من يقومون ببناء البيوت يفضلون عادة شراء أنواع غير مكلفة لكنها غير كفوءة لأنهم لم يكونوا مهتمين بكلف التشغيل. وشرعت عدة ولايات معايير للكفاءة نتيجة ذلك لكنها تباينت في ما بينها. وطلب مصنعو الأجهزة والمُنادين بالحفاظية من الكونغرس توفير معايير قياسية موحدة.

شخصية نحو ثلاثة أرباع الطاقة المستهلكة في قطاع النقل. وأكبر جزء من هذا الصنف وأكبر العوامل بروزاً في قطاع النقل في الحقيقة هي السيارة الشخصية التي تستهلك نحو 10 كواد من الطاقة سنوياً وهي نصف مجموع ما يستهلكه القطاع تقريباً.

وقد ركَّز الحفاظيون على السيارة الخاصة وسبب ذلك جزئياً هو بروزها في أنماط استهلاكنا للطاقة. غير أن توجهنا نحو ماكينة الاحتراق الداخلي واعتمادها للتنقل يحمل خطراً خاصاً أقلق محلِّلي الطاقة وصناع السياسة الحكوميين. هناك في الوقت الحالي فرصة محدودة لبدائل الموارد ذات أثر سعري. وهذه المشكلة تؤثر في قطاع النقل أكثر من أي قطاع آخر. ففي القطاع الكهربائي مثلاً تستطيع الصناعة بناء محطات أكثر تحرق مصادر الفحم الوفيرة أو تستخدم الطاقة الكهرومائية المتجددة إذا ما أردنا طاقة كهربائية أكثر. ويمكن للمصنّعين في القطاع الصناعي توليد حرارة للاستخدام أثناء عمليات المعالجة بواسطة الغاز أو الفحم أو النفط أو الكهرباء. وربما تنتج من الاستخدام المتزايد للقدرة الكهربائية بعض التأثيرات غير المرغوبة بما فيها زيادة الأسعار والتلوث، لكن المصادر متوافرة على الأقل ويمكن الاستعاضة بأحدها بدلاً من الآخر.

ويمكن لبعض السيارات أن تعمل على الإيثانول أو تستخدم البنزين التركيبي أو الوقود التركيبي (Synfuel). (وكان كونغرس الولايات المتحدة قد شرع عام 1988 قانوناً يشجع على استبدال وقود البنزين بالميثانول والإيثانول). لكن الوقود التركيبي أغلى كثيراً من النفط وما زالت تكنولوجيته في مراحل طفولتها المبكرة. وإذا ما ازداد استخدامنا للسيارة، فإننا عملياً سنستهلك كمية أكبر من النفط وسنستنزف هذا المورد عالمياً وذلك ما يترتب عليه مجازفة وقوع اضطراب اجتماعي من اختلال التجهيز من مصادره خارج البلاد.

وقد استدعت أزمة الطاقة خلال السبعينيات مناشَدتين من أتباع مذهب الحفاظية بالنسبة إلى استخدام السيارة. أولهما سعيهم إلى إقناع الأميركيين باستخدام وسائط النقل العام بنوعيه النقل بالقطارات الذي يستخدم في معظم الحالات القوة الكهربائية والنقل بالحافلات الذي يتصف بأنه أكفأ في استهلاك الوقود على أساس عدد الركاب. ولم يكن لهذا النداء سوى تأثير محدود.

ونجم عن تجهيز النفط والصدمات السعرية أيضاً نداءات لكفاءة أفضل في استخدام الوقود في السيارات واستُحثت حكومة الولايات المتحدة عام 1977 لإصدار تشريع ينص على معدل لكفاءة استخدام الوقود في السيارات الجديدة. وتبعاً لخطة الحكومة ترتب على صنّاع السيارات مع حلول عام 1986 أن يكون معدل كفاءة أسطول إنتاجهم الجديد 27.5 ميلاً للغالون*. وقام الكونغرس لاحقاً بتقليل القياس إلى 26 ميلاً للغالون بعد التماس شركات صنع السيارات. غير أن 26 ميلاً للغالون ما زال يمثل تحسناً مهماً، إذ كانت كفاءة أسطول السيارات جديدها وقديمها على المعدل عام 1973 تبلغ 13.1 ميل للغالون.

وأدت الجهود الحكومية التي أضيف إليها تحرك المستهلكين – استجابة إلى أسعار البنزين الأغلى – إلى المطالبة بسيارات أكثر كفاءة. وساعدت صدمات الطاقة على ترويج السيارات الأصغر والأكثر كفاءة من صنع أجنبي على النماذج الأميركية الأكبر والأقل كفاءة وأدت إلى حدوث أزمة في صناعة السيارات الأميركية. كان هناك افتراض في الصناعة يقول إن الذوق سيتغلب على اعتبارات سعر الطاقة كما كانت الحالة مع المصابيح. ولم يكن ذلك صحيحاً. ورغم ما كان يبدو من تفضيل الأميركيين للسيارات الأكبر حجماً إلا أن الازدياد الدراماتيكي في أسعار الطاقة كان الهم الأكبر. والأمر الأدهى أن صنّاع السيارات الأميركيين أهملوا إمكانية تحسين الكفاءة في السيارات الكبيرة، فالحجم وحده لا يقرر الكفاءة (الوزن يُعتبر عاملاً إلا أنه ليس حاسماً وحده). غير أن جيل السيارات الكبيرة الحالي ونتيجة التدخل الحكومي واهتمام المستهلكين بتوفير الوقود أصبح أكثر كفاءة مما كانت عليه قبل عقد. وقد تحسن أداء أسطول سيارات الولايات المتحدة ككل إلى 19.3 ميل لكل غالون عام 1991.

ومن المهم أن نعترف بحجم مصادر التوفير حتى من تحسن جزئي في عدد الأميال للأسطول ككل. فالتحسن من 18 إلى 20 ميلاً للغالون يعني توفيراً إضافياً يبلغ 200000 برميل من المنتجات النفطية المكررة يومياً وذلك أكثر من 0.4 كواد في السنة. إلا أن رفع المعدل إلى 26 ميلاً للغالون وهو ما لا يمكن إنجازه إلا بعد التخلص من السيارات القديمة فسيوفِّر أكثر من 1.5 مليون برميل في اليوم (بافتراض أن عدد الأميال

* هنا الكلام يخص الغالون الأميركي ويساوي 3.79 ليتر بينما تبلغ سعة الغالون البريطاني 4.55 ليتر الذي يساوي بدوره 1.2 غالون أميركي تقريباً.

المقطوعة يبقى ثابتاً). كما يمكننا أن نرى أن التراجع مع 27.5 ميل للغالون إلى 26 رغم كونه قليلاً إلا أنه سيسبب استهلاكاً أكبر بصورة ملحوظة.

إن المعدل لأسطول السيارات بكامله يمكن أن يزداد ليس إلى مجرد 27.5 ميل للغالون، بل إلى 50 ميلاً للغالون كما يقول أتباع المذهب الحفاظي أو أكثر. فبإمكان عدد قليل من النماذج المنتجة الآن أكانت تعمل بالديزل أم البنزين أن تحافظ على معدل 50 ميلاً في الغالون أو أكثر. إن مضاعفات تحسينات بهذا الحجم شيء غير عادي. فإذا ما ازداد على سبيل المثال عدد الأميال المقطوعة بمقدار 50 في المئة في عام 1995 بينما تتحسن الأميال المقطوعة بالغالون إلى 50 سيهبط الطلب إلى أقل من نصف المستويات الحالية، وهذا يمثل توفيراً يبلغ حوالى 4 كواد سنوياً.

وتوحي النماذج الريادية بإمكانية حصول كسب أكبر، إذ يَعِد تصميم لخلية وقود مفعلة بالمواد النفطية من تصميم شركة كرايسلر (انظر الملحق ج) باستهلاك يبلغ 80 ميلاً للغالون وتمتلك نماذج ريادية أخرى إمكانية الحصول على كفاءة أكبر في استهلاك الوقود. وقد وصل المعدل في بعضها إلى ما يقارب 100 ميل للغالون الواحد. وقد تم إحراز هذا الكسب بواسطة تقليل الوزن وتصغير الحجم وهو ما قد يمثل تضحية في السلامة أو الراحة. وقد يتم اللجوء أيضاً إلى استغلال تكنولوجيات غريبة تحتاج إلى إثبات موثوقيتها ورخص سعرها بحيث إن سعر السيارة لا يفوق تحسينات القدرة.

ومع ذلك، فإن استخدام التكنولوجيا الحالية يتيح رفع معدل الأسطول الجديد إلى 35 ميلاً للغالون أو أكثر*، وربما نحصل على كسب أكبر من التطورات التكنولوجية بما فيها تطوير مواد متينة خفيفة الوزن مثل الخزفيات (Ceramics) واللدائن والمواد المُركّبة (Composites).

القطاع الصناعي

بدأ استهلاك الطاقة في القطاع الصناعي يتزايد في السنين القليلة الأخيرة بعد

* مازال معدل الاستهلاك في سنة 2009 عند الحدود التي وضعها الكونغرس والبالغة 27.5 ميل للغالون منذ سنة 1990 إلا أن الرئيس أوباما يهدف إلى رفع هذا الرقم إلى 42 ميلاً للغالون مع حلول سنة 2016 وهو رقم لا تتجاوزه إلا ثلاثة أنواع من السيارات المنتجة عام 2009.

انخفاض مطّرد منذ السبعينيات وأوائل الثمانينيات. وقد كان هناك بالطبع حتى في السنين الأخيرة كسب عن كل دولار من المنتوج. والواقع أنه رغم الاضطراب الأخير الذي كان مدفوعاً من دون شك بهبوط أسعار الطاقة كانت هناك مكاسب حفاظية فعلاً في الصناعة في الولايات المتحدة، وكان من المتوقع أن تكون أكثر. ولا تعطي هذه الأرقام على أي حال الصورة الكاملة لاستخدام الطاقة في القطاع الصناعي.

تستهلك الصناعة الطاقة بالدرجة الأولى لتوليد بخار المعالجة (كما في صناعة الورق) أو للتسخين (كما في صهر المعادن). وتستخدم الشركات الصناعية أيضاً الطاقة الكهربائية لتشغيل المعدات الميكانيكية وفي استخدامات مباشرة في العمليات الكيميائية والتحليل الكهربائي.

ولم تأت نسبة مئوية مهمة من التوفير من الحفاظية من أي نوع، بل من تغير بنيوي في الاقتصاد الأميركي. فالنسبة المئوية للمنتوجات من الصناعات كثيفة الاستهلاك للطاقة كما لاحظنا في العقود الأخيرة، وبخاصة منذ السبعينيات، قد تقلصت فيما ارتفعت النسبة المئوية للقطاع الأقل استهلاكاً للطاقة بصورة ملموسة. (وهذا مسؤول بالطبع عن جزء من الزيادة في الاستهلاك في القطاع السكني/ التجاري ولا يعود ذلك إلى الهدر بل إلى التوسع في اقتصاد الخدمات). ولم تقم المصانع في هذه العملية التطورية بإعادة تجهيز ذاتها بماكينات أكثر كفاءة، بل إنها أقفلت وحولت مواردها المالية إلى نشاطات أخرى، فبعض المصانع في الحقيقة حولت إلى مجمعات تسوق أو جرى تكييفها بوسائل أخرى لقطاع الخدمات. وقد كانت هناك حتى داخل الصناعة ذاتها تحولات من التصنيع كثيف الاستخدام للطاقة مثل صناعة الصلب إلى صناعات كثيفة الاستخدام لرأس المال مثل التكنولوجيا الحيوية. وتبعاً لإحدى الدراسات، فإن 11.2 في المئة من توفيرات الطاقة في الصناعة لكل وحدة إنتاج كانت تعزى إلى تغير في الاقتصاد ذاته وتعطي مزيجاً مختلفاً لمتطلبات الطاقة (انظر الجدول رقم 5.4، وأيضاً (Peck and Beggs in: Sawhill and Cotton, 1986). وقد تسارع ذلك التوجه أوائل الثمانينيات رغم أن هبوط قيمة الدولار الأميركي وهبوط أسعار الطاقة في الجزء الأخير من العقد أعاد إحياء الصناعة الثقيلة (كثيفة الاستخدام للطاقة) إلى حد ما وربما أبطأ التحول.

وتوضح التغيرات البنيوية في الاقتصاد بعضاً من توفيرات الطاقة إنما ليس كلها.

والحقيقة كما يبين الجدول 5.4 أن 28.3 في المئة من التحسينات في استهلاك الصناعة التي أبلغ عنها في الدراسة ذاتها عام 1982 جاءت من تحسينات الكفاءة، أي إن الصناعة كانت تنتج الكمية نفسها باستهلاك أقل للطاقة. ويمثل ما يزيد قليلاً على 10 في المئة من التحسينات استمراراً للتوجه التاريخي: لقد كانت هناك تحسينات تقنية في العمليات الصناعية عبر الزمن خفضت متطلبات الطاقة لحجم معين من الإنتاج.

الجدول 5.4: تقديرات استهلاك الوقود عام 1981 بكفاءة استخدام الطاقة عام 1972

مصادر خفض استهلاك الوقود عام 1981	النسبة المئوية
التحول في مزيج المنتوج (أ)	11.2
التوجه التاريخي لتوفير الوقود (ب)	10.3
التسريع في توفير الوقود (ج)	18.0
الزيادة الكلية لطاقة عام 1981 مع كفاءة عام 1972 ومزيج منتوجها (د)	39.5

(أ) عوامل استخدام التقدير طورها روبرت مارلاي لقياس التحولات البنيوية في استخدام الطاقة في المخرجات الصناعية نحو أو بعيداً عن الصناعات كثيفة الاستخدام للطاقة.

(ب) إن النسبة السنوية البالغة 0.8 في خفض الوقود لكل وحدة إنتاج اعتباراً من عام 1953 لغاية 1972 تطبق على التوجه التاريخي لكفاءة عام 1972 ويجري ذكر ذلك التوفير كنسبة مئوية من استهلاك الطاقة الفعلي عام 1981.

(ج) محتسبة كفضلة

(د) الاختلاف في ما سيكون عليه استهلاك 1981 للطاقة مذكوراً بوحدات حرارية بريطانية من دون التحسينات في كفاءة الطاقة بعد 1972 واستهلاك الطاقة الفعلي معبراً عنه كنسبة مئوية من استهلاك عام 1981.

المصدر: M J. Peck and J. J. Beggs in: Sawhill and Cotton, eds. (1986).

لكن الباقي وهو 18 في المئة من التوفير يمثل استجابة لكلف الطاقة المتزايدة في عقد السبعينيات وسعي متسارع إلى تحسين الكفاءة كوسيلة للإبقاء على عامل الكلفة الحاسم منخفضاً. وباستخدام تحليل هوغان نستنتج أن القوة المحركة نحو عملية حفاظ أكبر في الصناعة ما زالت ممكنة[12].

12 من المهم أن نلاحظ أن استجابة الصناعة لازمة الطاقة في السبعينيات لم تكن دائماً حركة نحو كفاءة أكبر في الكلفة. كانت تلك هي الوجهة السائدة لكن بعض العوامل المؤثرة جعلت المصنعين يأخذون خيارات لم تكن أفضل =

نتج بعض الكسب في الكفاءة في أوائل الثمانينيات في الحقيقة بسبب الكساد الذي كان سائداً في تلك الفترة. ولم يكن ذلك ببساطة مسألة طلب متقلص على السلع المصنعة يؤدي بدوره إلى إنتاج مصنعي متضاءل وإلى استهلاك أقل للطاقة نتيجة ذلك. فنقص الطلب الذي سببه الكساد يضغط على المنتجين الهامشيين ذوي الكلفة العالية بشدة، تاركاً المصانع الأكثر كفاءة مع حصة أكبر في السوق عندما يعود النمو على الطلب. ورغم تعاظم الطلب كما حدث في الولايات المتحدة في نهاية الثمانينيات وفي التسعينيات نرى بعضاً من المصانع الأقل كفاءة تعود إلى الإنتاج فقط. أما الأخرى فلن تكون موجودة ليعاد إحياؤها. ولكي يحصلوا على جزء من الطلب الجديد يقوم المنتجون ذوو الكلفة المنخفضة ممن ما زالوا في الساحة بتبديل معداتهم الرأسمالية بأخرى أحدث، ما يجعل عملية الإنتاج الصناعي لديهم أكفأ.

كانت هناك بالطبع استثمارات مهمة في الحفاظية من قبل الصناعة وكما في أي قطاع آخر أكثر من هذا. وكما في القطاعين الآخرين المصانع والمعدات الجديدة أكثر كفاءة وسيجري في النهاية استبدال التجهيزات القديمة بأخرى حديثة رغم أن الشركة تحتاج إلى توضيح للجدوى الربحية للقيام بمثل هذه الاستثمارات. وربما تعتمد كمية الاستثمار الهادف إلى الحفاظية (وسرعة إنجازه) في الصناعات المختلفة بالطبع على أهمية كلفة الطاقة في الإنتاج. وتمثل الطاقة كما لاحظنا كعامل كلفة يبلغ 4 في المئة فقط. غير أن هذا معدَّل لكل الصناعات. وبعض الصناعات تستخدم الطاقة بكثافة أكبر من غيرها ويكون استبدال رأس المال بالطاقة في هذه الصناعات ذا أثر على الكلفة مثل الصدمات السعرية التي عاناها السوق في السبعينيات.

توفِّر صناعة الإسمنت مثالاً ممتازاً لإمكانية ووقع الاستثمارات الحفاظية في صناعة كثيفة الاستخدام للطاقة[13]. وكانت الطاقة عام 1974 بحسب دراسة قام بها بيك

= الخيارات من حيث الكلفة أو من حيث كفاءة الطاقة. فكما يشير (Peck and Beggs) يغلب أن يكون من الأرخص للمشروع الصناعي أن يتحول من النفط إلى الكهرباء بدلاً من الفحم، رغم أن الأخير هو الوقود الأرخص للسعرة الحرارية. والفحم على أي حال قد يحتاج إلى معدات خاصة لحماية البيئة ويصبح مجدياً سعرياً عندما يتزايد مقياس العمل (ومدخول الطاقة). وكانت صدمات السبعينيات أيضاً على مستويين: صدمات سعرية وصدمات في التجهيز لكل من النفط والغاز، وكانت مصادر الطاقة فيها غير متوافرة. وقد اختار المصنعون الكهرباء في بعض الحالات لتوكيد تجهيزات الطاقة، رغم أن الخيار قد لا يكون أكثر جدوى من حيث الكلفة.

13 يصنع الإسمنت بمزج حجر الكلس مع مقادير صغيرة من الطين وخام الحديد والرمل وحتى صدفات البحار. ويجري اضرام النار في هذا المزيج في فرن دوار لإنتاج. كتل صغيرة تعرف باسم (كلينكر). بعد ذلك يجري مزج طن الكلينكر مع مادة الجبس. وتستهلك النار التي تضرم في الفرن أكبر كمية من الطاقة.

وبيغز تمثل 25 في المئة من كلفة الإنتاج. وسيكون تخفيض يبلغ 10 في المئة في استهلاك الطاقة (أو على الأقل في كلفتها) يعني تخفيضاً ملحوظاً يبلغ 2.5 في المئة وسيكون أي خفض أكبر للطاقة أكثر جاذبية.

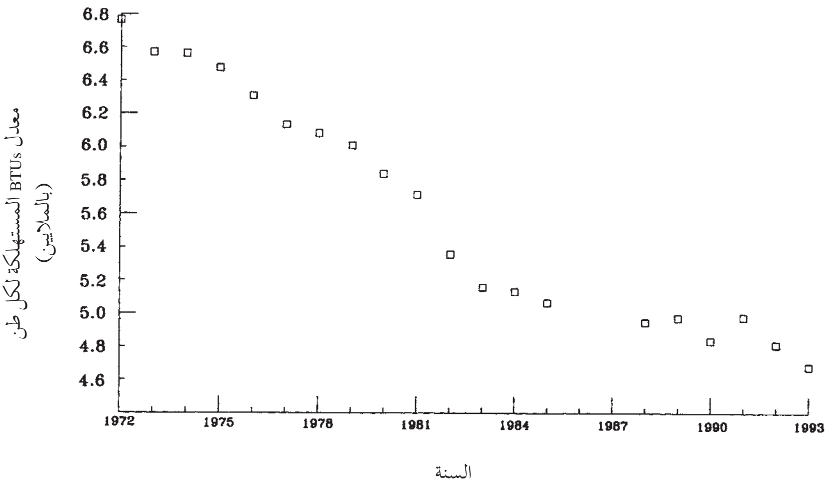
وفي عقد السبعينيات بدأت الصناعة وهي تبحث عن طرق للتقليل من كلفة الطاقة (وحماية تجهيزات الوقود) بعملية استبدال واسعة النطاق للفحم محل النفط والغاز الطبيعي. لاحظ في هذا الخصوص التبدل السريع جداً في مزيج الوقود من عام 1972 حتى عام 1980 كما في الجدول 4.6. وسيكون استبدال أنواع الوقود وحده مسؤولاً عن خفض كلفة الطاقة لكل وحدة إنتاجية بنحو 9 في المئة حتى قبل أن يكون هناك أي تغييرات أخرى في المصانع أو المعدات. لكن كسباً كبيراً في الكفاءة تحقَّق أيضاً. ففي عام 1972 استخدمت صناعة الولايات المتحدة 6.75 مليون وحده حرارية بريطانية لكل طن من الإسمنت المنتج. وقد هبط هذا الرقم إلى دون 5.9 مليون وحدة مع حلول عام 1980 – ويمثل هذا تحسناً يبلغ 12.6 في المئة (الشكل 6.4). ونجم الكسب بصورة رئيسة عن استبدال المصانع القديمة بأخرى أحدث كانت تتمتع بكفاءة تزيد على سابقتها بنسبة 33 في المئة على الأقل. ولما كان متوسط عمر مصانع الإسمنت عام 1981 ما زال يبلغ حوالى 19 سنة فمن الواضح وجود مجال كبير لتحسينات أكثر.

الجدول 6.4: مصادر الوقود المستخدم من قبل صناعة الإسمنت في الولايات المتحدة (الأرقام تمثل نسب مئوية من أنواع الوقود)

العام	الفحم	النفط	الغاز الطبيعي	الكهرباء	مواد النفاية (أ)
1972	30.3	12.9	39.3	11.3	
1980	60.8	5.2	12.8	21.2	
1990	73.1	1.3	9.9	9.9	5.9
1994	74.2	1.1	7.2	10.1	7.4

(أ) تشمل منتجات النفاية الوقود المشتق من إطارات السيارات (القديمة) وزيوت النفاية والسوائل المشتقة من النفايات.

المصادر: مُستقى من US Bureau of Mines, Minerals Year Book, Vol. 1, annual eds. and the US Portland Cement Association (1996).



الشكل 6.4: استخدام الطاقة في صناعة الإسمنت في الولايات المتحدة

المصدر: Portland Cement Association. Market and Economic Research Department, July 1994.

واستمرت التوجهات في استبدال الوقود وفي تحسين الكفاءة في التسعينيات، رغم هبوط أسعار النفط والغاز الطبيعي. ومع حلول عام 1994 (الجدول 6.4) لم يعد النفط عاملاً رئيساً في الإنتاج ولم تتعد نسبته في الطاقة المستهلكة في صناعة الإسمنت 1.1 في المئة. ولم يكن للغاز الطبيعي أيضاً ذلك الأثر، إذ إن 7 في المئة من الإسمنت فقط كان ينتج بواسطة الغاز الطبيعي. أما الفحم فقد أصبح الوقود المفضل. الأكثر من ذلك أن 7.4 في المئة من كل الطاقة المستخدمة جاءت من النفايات مثل إطارات السيارات القديمة. أما بالنسبة إلى الكفاءة فقد تطلب طناً من الإسمنت على المعدل 4.72 مليون وحدة حرارية بريطانية من الطاقة، ويمثل ذلك تحسناً إضافياً يبلغ 18 في المئة.

ويعتقد أتباع مبدأ الحفاظية بوجود إمكانية كبيرة في القطاعات الصناعية كافة في الولايات المتحدة للكسب في الكفاءة. وتقدر واحدة من الدراسات أن الصناعة في الولايات المتحدة تستطيع من خلال استخدام أكثر التكنولوجيات كفاءة من استهلاك 40 في المئة أقل من الطاقة سنوياً عام 2020 من مقارنة بما تستخدمه الآن حتى إذا ارتفع الناتج المحلي الإجمالي بنحو 50 في المئة (انظر Goldemberg. *et. al,* 1987). ويبدو

أن هناك شكاً في إمكانية آلية السعر وحدَها على توفير ما يكفي من التحفيز للحصول على مثل هذه المكاسب. وإذا ما زاد سعر النفط فقد يكون استبدال نوع الوقود أكثر فعالية من حيث الكلفة مقارنة بتحسين الكفاءة، وغالباً ما يكون تحقيق ذلك أسهل وأرخص وهناك تأمين على وجود مصدر واحد على الأقل بصورة غزيرة وهو الفحم (يبين الجدول 7.4 حصة كل نوع من مصادر الطاقة الحالية في التجهيز). وإذا ما استقرت أسعار مصادر الطاقة فسيكون الحافز السوقي للحفاظ أضعف، كما بينت التجارب الأخيرة.

الجدول 7.4: مصادر التجهيز للطلب على الطاقة في الولايات المتحدة 1993

المصدر	التجهيز (كواد)	الحصة المئوية
النفط	33.8	40
الغاز الطبيعي	20.8	25
الفحم	19.6	23
الكهرومائية والجيوحرارية	3.2	4
النووية	6.5	8
المجموع	84.0	100

ملاحظة: هناك 0.04 كواد مدرجة كأنواع أخرى وتشمل الطاقة الشمسية وطاقة الريح والخشب والنفايات والمصادر المتجددة الأخرى. ولا يساوي المجموع حاصل الجميع بسبب تدوير الأرقام المستقل.

المصدر: Annual Energy Review, 1993, Energy Information Administration.

الحفاظية والسياسة

هناك أدلة واضحة على أن اقتصاد الولايات المتحدة قادر على الحفاظ على قدر أكبر من الطاقة، وإنما هناك أسئلة مهمة لا تزال قائمة: ما المطلوب لتحقيق هذه الإمكانية؟ هل سيكون الحل منصفاً؟ وهل إن برنامجاً لتعظيم الحفاظية مرغوب فيه؟ فالخيارات السياسية تمتد إلى مساحة واسعة من قرار للمجتمع السماح للسوق أن تقرر إلى آخر يتطلب تدخلاً وسيطرة حكومية على نطاق واسع. في إحدى نهايتي

المجال قد توفِّر الحكومة فقط المعلومات، بينما يمكن في النهاية الأخرى أن تمتلك القوة للتشريع للحفاظية والتحكم، أو تقتصد في التجهيزات وتستخدم حتى إجراءات قسرية لتحقق توفيراً في استهلاك الطاقة.

يبدو أن الحجج المائلة إلى ترك الأسعار وحدها تقرر لها سوابق قوية إلى جانبها في الولايات المتحدة. ففي بداية الثمانينيات جرى ضبط السوق ونجم عن آلية السعر بحث عن الكفاءة والاستبدال. ونتوقع أن نواجه ارتفاعاً في الأسعار ونقصاً في التجهيز إذا ما ترك الأمر وحده، وهذا بدوره سيؤدي إلى تخفيض الطلب – عبر فترة زمنية وبمرونة تقارب الوحدة. وسيجري البحث عن تأثير تحسينات التقنية في الكلفة، وبذلك تقلل متطلبات الطاقة للنمو الاقتصادي. وإذا ما كان هناك أي دور للحكومة في هذا السيناريو، فلن يتجاوز الدور التثقيفي لمساعدة الناس على اتخاذ خيارات منطقية ومدعمة بالمعلومات في السوق. وقد تساعد الحكومة المستهلكين مثلاً على فهم كيف أن الاتفاق الآن مع منتجات أكثر كفاءة سيؤدي في النهاية إلى توفير مالي وتوفير في استهلاك الطاقة.

أما أولئك الذين يرومون تدخل الحكومة فيفعلون ذلك للمساعدة في وضع الحل الأمثل لتشغيل نظام الحصص أو لتعزيز غاية فلسفية تسعى إلى الحفاظ على موارد العالم أو كليهما. ورغم أن الأدلة الحديثة أوحت بأن السوق تعمل بصورة أفضل مما ادعاه بعض النقاد يوماً ما، إلا أن هناك سؤالين مع ذلك يجب إثارتهما عن سلوكية السوق.

وهذه الأسئلة لا تخص كثيراً الطلب على الطاقة قدر تعلقها بالتجهيز. أولهما أن سوق الطاقة أو مكونها الحيوي على الأقل وهو النفط بدّل ميزته بطرق مقلقة أكثر من مرة خلال الفترة من الستينيات لغاية الثمانينيات. فقد كانت سوق النفط في الستينيات في الولايات المتحدة في أساسها احتكاراً للقلّة وهو ما يعرفه الاقتصاديون على أنه سوق يتحكم بها عدد قليل من المجهزين وهم في هذه الحالة بضع شركات كبرى. وكانت التجهيزات في معظمها ذات مصدر محلي وغزيرة مبتذلة وبقيت الأسعار منخفضة نسبياً. لكن مركز السيطرة، في عقد السبعينيات عندما ارتفع الطلب الداخلي متجاوزاً التجهيز انتقل إلى منظمة أوبك التي ثبتت الأسعار ونظّمت الإنتاج العالمي

لتلائم أعضاءها. لكن قوتها على أي حال كسرت في الثمانينيات ويعود ذلك جزئياً إلى أن الطلب على النفط في الدول الصناعية تراجع كما إن الأسعار العالية شجّعت على الاستكشاف ومع إيجاد مصادر جديدة للتجهيز من قبل شركات وأقطار خارج الكارتيل مثل النرويج وبريطانيا. وهذا ما خفف من قوة أوبك في أواسط الثمانينيات على تحديد التجهيز في السوق العالمية ما نتج منه استقرار السعر ثم هبوطه. إن التخمة الناجمة وهبوط الأسعار أتاحا للسوق في الحقيقة أن تستقر بسرعة أكبر بكثير مما لو أن الاستجابة كانت بتعديل تغير الطلب. وباستخدام تحليل هوغان ثانية يستوجب الأمر أن نقول إن السوق اعتماداً على الطلب وحده ـ مع استقرار كل شيء آخر ـ ربما احتاجت إلى عقد كامل تقريباً لينتظم. ومع ذلك فقد احتاجت في هذه الحالة إلى بضعة سنين فقط قبل أن تحطم قوى السوق قوة الكارتيل.

ما الذي سيحدث إذا ما تكررت حالة السوق أثناء السبعينيات خلال القرن الحادي والعشرين؟ ربما نفترض أن الطلب على الطاقة سيزداد مع مرور الزمن وستكون النتيجة في أغلب الاحتمالات أسعاراً متزايدة باطراد للنفط. علينا أن نتذكر (من الفصل الثاني) أن الاحتياطي هي تلك الكميات التي يمكن استخراجها اقتصادياً. ومع استنزاف الموارد قليلة الكلفة ومن دون اكتشاف حقول كبيرة جديدة من النفط سهل الاستخراج لن يمكن توفير التجهيزات إلا بأسعار متزايدة. والبديل الآخر أن منظمة أوبك قد تستعيد هيمنتها على سوق النفط بحكم سيطرتها على أكبر نسبة مئوية من الاحتياطيات المعروفة والمحتملة (انظر الفصل الخامس). والاحتمال الأخير قد يتضمن مترتبات سياسية غير مقبولة بينما يتضمن الخيار الأول مترتبات اقتصادية مهمة.

فكر في السيناريو الآتي: في المستقبل سنكون على المنحدر الهابط من منحنى الإنتاج ذي الشكل الناقوسي لإنتاج النفط العالمي (انظر الفصل الثاني) وستكون السوق وحدها عاملاً في موازنة التجهيز والطلب. وسيستمر نمو السكان والاقتصاد في الدول النامية ما سيضع ضغطاً صاعداً في الطلب على النفط. السعر يرتفع لكي يحفز الاستخراج أو موارد أكثر. وأوبك تستعيد قوتها. وتحدث المنظمة هادفة إلى كسب سياسي عجزاً في التجهيز ما يدفع بالأسعار إلى مستويات أعلى (ويصاحب ذلك البحث عن تجهيزات أكثر في مناطق أخرى) ـ في المدى القصير في الأقل.

وسواء عملت السوق أم لم تعمل في تنظيم الطلب، فإن صنّاع السياسة لا يمكنهم تجاهل النتائج السياسية المترتبة على الانتظار لكي يقوموا بالتنظيم اللازم وفي مجتمع حر مثل مجتمعنا قد يفضّل السوق الحرة، لكن المسؤولين الحكوميين والمجتمع بصورة عامة يمكن أن يواجهوا بقرار للتدخل في السوق للحفاظ على الحرية السياسية الوطنية في العمل.

إضافة إلى ذلك قد تكون النتائج الاقتصادية كبيرة. فقد انقضى عقد منذ انتهاء أزمة النفط الأخيرة إنما علينا أن نتذكر كيف أن ارتباكاً قصير المدى في سوق النفط أصاب الاقتصاد العالمي المعتمد على النفط بالاضطراب . إذ أدت صدمات الطاقة في نهاية السبعينيات إلى أسوأ ركود عانى منه العالم منذ الثلاثينيات في حين صرفت مبالغ وجهود أكبر على الطاقة. لكن الحفاظ وزيادة التجهيزات قضَيا في النهاية على حدة الأزمة وفقدت منظمة الأوبك هيمنتها. وإذا لم توفِّر تجهيزات إضافية رخيصة أو استبدالات رخيصة الثمن يمكن أن تكون عملية إعادة التنظيم مع الصدمات التالية أطول. إن فترة الكساد في أوائل الثمانينيات دامت ثلاث سنوات لكن إذا كان الطلب وحده يجب تنظيمه كما رأينا استناداً إلى مرونات المدى البعيد مقابل المدى القصير فيمكن أن يكون التخلف الزمني أطول بمرتين أو ثلاث مرات وستكون الضائقة الاقتصادية أشد – وهي ضائقة ستصيب الأمم الفقيرة بأثقل صورها. وستكون النتائج الاقتصادية في زيادة الأسعار المطردة حتى إذا لم تحصل الأوبك على أي فائدة سياسية من موقعها في السوق، كبيرة ويمكن أن تستغرق إعادة التنظيم، متوقعة مع ذلك، سنوات طويلة لكي يظهر تأثيرها.

وسيكون من الصعب على الناس وبخاصة في الولايات المتحدة أن يصدقوا بأن مثل هذا السيناريو ممكن – فقد قوبلت أسعار النفط المرتفعة في التسعينيات بالمشكوكية حول دوافع الصناعة النفطية وحول حقيقة النقص في تجهيز السوق. وغالباً ما كانت هناك في مناسبات كثيرة دعوات لتدخل حكومي لكن هذه الطلبات طالبت الحكومات بتخفيض السعر بدلاً من تشجيع تغييرات في الطلب[14].

---

14 على سبيل المثال أدى رفع الأسعار الوقتي في منتصف سنة 1996 بالسياسيين إلى لوم بعضهم البعض و/ أو الشركات النفطية ودافع السياسيون من كِلا الحزبين الأميركيين عن فكرة التدخل الحكومي الهادف بوجه خاص إلى خفض سعر البنزين.

ورغم ذلك فإن السعر على المدى البعيد لا يمكن إلا أن يرتفع ويبقى مرتفعاً مع استنزاف النفط رخيص الكلفة. وربما تبقى التجهيزات مرتفعة السعر لكن قد يوجد بديل أرخص لاستخراجها؟ وتبعاً لما تقوله مجلة *Business Week* فحتى في أواسط الثمانينيات «كان توفير النفط أقل كلفة من إيجاده».

غير أن تحقيق هذه التوفيرات يتضمن مشكلة. فالتوفيرات تمثل توفيراً اجتماعياً وتكلف المجتمع أقل بلغة الموارد مثل رأس المال والنقود والزمن لتبني الحفاظ بدلاً من الحفر الجديد. لكن تبني الحفاظ يتضمن كلفاً شخصية للأفراد. لذا فإن بعضهم يدافع عن التدخل الحكومي في السوق لخلق حوافز مناسبة حتى يستفيد الأفراد من الحفاظ أو البديل أن يشرح الحفاظ بقانون كمنفعة اجتماعية يجب على الناس اتباعها. وهذه الحوافز كما تقول هذه الحجة يجب أن تفعّل حتى عندما تكون أسعار الطاقة منخفضة لإحباط أزمات المستقبل قبل أن تقع.

ويمكن لسياسة الحفاظ التدخلية أن تأخذ عدة أشكال. فبإمكان الحكومة استخدام سلطتها في التنظيم وفي فرض الضرائب أو بصورة قسرية. وكانت مجلة *Business Week* قد اقترحت عام 1987 أن تضع الحكومة عبء الحفاظ على الصناعة وتفويض استمرار وتسريع التوجه نحو منتجات أكثر كفاءة في الطاقة. ولاحظت المجلة إمكانية زيادة الأميال لكل غالون من الوقود في السيارات وتحسين كفاءة استخدام الطاقة في بقية الأجهزة المنزلية.

ودعا خبراء آخرون إلى أشكال أخرى للتدخل. وأحد أكثر الأفكار رواجاً هي أن تقدم الحكومة مساعدات ضريبية للتحسينات الرامية إلى الحفاظية في الدور والمصالح التجارية، أو أن تفرض ضرائب جديدة على البنزين أو النفط المستورد وأن تُبقي على الأسعار مرتفعة لتقليل الطلب. ويمكن أن توجه السياسة أيضاً نحو إنتاج سلع أكثر كفاءة أو نحو توسيع خيارات البدائل من خلال بحوث ترعاها الحكومة. وقد لاحظ منتقدو السياسات الحكومية المساعدات التي تقدمها الحكومة من خلال شطب الضرائب[15] على أعمال حفر آبار النفط والغاز وعلى بناء محطات طاقة كبيرة.

15 حصل من يقومون بالحفر عن النفط والغاز في الولايات المتحدة على حسم ضريبي من الحكومة الاتحادية منذ سنين طويلة وهو ما يدعى (حسم استنزاف النفط Oil Depletion Allowance). وهذا ما يفترض تعويضاً عن تناقص ممتلكات موارد طبيعية ويسمح لمالك إنقاص دخله الخاضع للضريبة بنسبة مئوية معينة كل سنة. سمح كذلك =

وقد حثوا الحكومة على إعطاء إعانات مشابهة للفعاليات الحفاظية. وعند المستوى الأبعد للتدخل يمكن للحكومة أن توزع مصادر الطاقة حصصاً، أو أن تتمسك بمهمة توزيع الطاقة ووسائل نقلها.

أما المروجون للسوق الحرة فينظرون إلى أي تدخل في السوق بعين الريبة وهم لا يفتقدون أسساً لنظرتهم. فقد برهنت سوق الطاقة على قدرتها على العمل في العديد من الظروف عبر فترة زمنية طويلة. والأهم من ذلك أن الحكومات لم تكن فاعلة دوماً عندما تحكمت بالسوق. فالاقتصاد المخطط مركزياً والصناعات الخاضعة للسيطرة الحكومية لا تعمل بكفاءة مثيلاتها الخاصة نفسها. وقد ساعد التدخل الحكومي في الولايات المتحدة في أمور الطاقة في بعض الأحيان لكنه كان كارثياً في أحيان أخرى. فالتشريع الحكومي حول كفاءة السيارات في استهلاك الوقود له الفضل في تقلص الطلب على الطاقة، لكن مؤسسة البحث والتطوير التي تشرف عليها الحكومة (Synfuel Corporation) هدرت مبالغ كبيرة كان يمكن استثمارها في أغراض أخرى ولم تقدم إلا النزر اليسير من النتائج الإيجابية (انظر الفصل الحادي عشر). وفي الوقت ذاته ورغم ما يقال عن أن السوق توفِّر كفاءة أفضل إلا أن ما ينتج منها – وبخاصة على المدى القريب ـ قد لا يتصف بالعدل وقد لا تكون النتائج الاجتماعية للاعتماد على السوق وحدها مقبولة.

وربما يعني الاعتماد على السوق خياراً سياسياً لتقبل المشاكل الاقتصادية والسياسية بدلاً من محاولة منعها. لكن سياسة المنع قد تعني في أي حال فقدان الحرية وربما هدراً وسوء إدارة حكومية. وأي الخيارين المفضل؟ هذا هو المأزق الذي يواجهه مجتمعنا وعلينا إيجاد حل له في العقود القادمة وعلينا أن نعتبر شيئاً آخر ذا فائدة هنا. فالأميركيون قد يكونون قادرين، أو قد لا يكونون، على استهلاك مقادير أقل من الطاقة في حين يحتفظون بالنمو الاقتصادي. أما البلدان النامية فالحقيقة لا خيار لديها: يجب أن يزداد استهلاكها لتقدر على تطوير اقتصاديات متقدمة. وإذا لم يقم العالم الصناعي بالحفاظ فقد يجد نفسه في تنافس على الموارد العالمية. وكما سنرى في الفصل القادم سيكون لهذا مضامين سياسية واقتصادية وأخلاقية.

= القائمون بالحفر استقطاع ما سمي (كلف الحفر غير الملموسة Intangible Drilling Costs) (وهي كلف البحث عن موارد جديدة) من دخلهم الكلي. وقد مُنِح صانعو ومستخدمو معدات الحفاظ على الطاقة البديلة محفزات إضافية في احتساب الاحتياطي في نهاية السبعينيات لكن معظمها شطبت خلال الثمانينيات.

المراجع

Dorf, R. C. 1978. *Energy, Resources and Policy*. Addison-Wesley, Reading, MA.

Freemans, S. D. *A Time to Choose*. The Energy Policy Project of the Ford Foundation. Ballinger, Cambridge, MA: 1974.

Goldemberg, J. [etal.] *Energy for a Sustainable World*. World Resources Institute, Washington, DC 1987.

Hirsch, R.L. «Impending United States Energy Crisis». Science, March 20, 1987. pp. 1460 - 70.

Kaplan, S. *Energy Economics: Quantitative Methods for Energy and Environmental Decisions*. New York. McGraw-Hill, 1983.

LeBel, P.G. *Energy Economics and Technology*. John Hopkins, Baltimore 1982.

Lovins, A.b., and L. H. Lovins, «The Avoidable Oil Crisis» The Atlantic, December, pp 22- 30, 1987.

Reisner, M. «The Rise and Fall of Energy Conservation». *The Amicus Journal,* Spring, pp. 22 - 31, 1987.

Rosenfeld, A. H., and D. Hafemeister, «Energy-efficient Buildings». *Scientific American*, April, pp. 78 -87, 1988.

Ross, M. H. and R. H. Williams. *Our Energy: Regaining Control* McGraw-Hill, New York 1981.

Sawhill, J. C., and R. Cotton (eds). *Energy Conservation Successes and Faihures*. The Brookings Institution, Washington, EC, 1986.

Stobaugh, R., and D. Yergin (eds). *Energy Future,* 3rd edition. Vintage, New York, 1983.

الفصل الخامس

المنظور العالمي

مقدمة

المسألة الرئيسة التي تواجه الولايات المتحدة والعالم الصناعي هي كيفية إدامة النمو الاقتصادي في المستقبل بوجه مصادر متضاءلة للطاقة. غير أن القضايا المتعلقة بالطاقة بالنسبة إلى بقية العالم أمر مختلف. فالأمم الأخرى تحتاج إلى موارد الطاقة وإلى التكنولوجيا لتخرج من عبء ما هو في العديد من الحالات فقر مدقع ومزمن. ونحتاج إلى إيجاد اقتصاديات صناعية لا إدامتها فقط. ومع ذلك فإن كلفة الطاقة وكلفة النمو ذاته كانت غالباً كبيرة جداً لها لكي تسددها – كبيرة جداً بيئياً ومالياً وحتى اجتماعياً. غير أن الحاجات ظلت قائمة. فكيف إذن تحصل على موارد الطاقة والتكنولوجيا المطلوبين للنمو. وكيف يستثمرون ما يمتلكونه من موارد؟ وما هي السياسات التي يستطيعون تبنيها ليحصلوا على التطور الاقتصادي؟

وما هي السياسات التي يجب أن يتبناها العالم الصناعي بالنسبة إلى الدول الأقل تطوراً؟ لما كان العالم الصناعي يمتلك معظم رأس المال والموارد التقنية فباستطاعته أداء دور ويجب عليه جدلياً أن يؤدي دوراً رئيساً في تحديد ودفع مسار التنمية الاقتصادية قُدُماً في الدول الأقل تطوراً. إن مأزقها له مضامين أخلاقية وسياسية. والحقيقة كما سنرى في ما بعد في هذا الفصل أن سياسات العالم الصناعي قد تكون بالنسبة إلى الدول الأقل تطوراً بالأهمية نفسها لسياساتها ذاتها.

هناك بالطبع اختلافات واسعة بين الدول الأقل تطوراً وتتباين احتياجاتها ومشاكلها بطرق مهمة. فبعضها يمتلك مصادر وافرة للطاقة فيما لا تمتلك دول أخرى شيئاً منها بتاتاً. بعضها يقوم بتصنيع اقتصادياتها بصورة سريعة وربما ستلتحق بصفوف العالم الصناعي قريباً بغض النظر عما يفعله. ولا تمتلك دول أخرى إلا قليلاً من الأمل لإحراز تقدم كبير وهي في بعض الحالات تزداد فقراً في الواقع. وسيكون هدف هذه الدول النامية التي تضم بين ظهرانيها الجزء الأعظم من سكان العالم السعي إلى ردم الفجوة

بينها وبين العالم الصناعي إما بمساعدة الدول الغنية أو في نزاع معها. إن كلفة المساعدة بالنسبة إلى العالم الصناعي قد تكون كبيرة لكن كلفة النزاع قد تكون حتى أكبر من ذلك. وستقرر الدول الغنية والفقيرة وهي مجتمعة بحكم الضرورة في النهاية المسار الذي يجب اتباعه.

النمو الاقتصادي العالمي والطلب على الطاقة

سينمو استهلاك الطاقة، كما أشرنا إلى ذلك في نهاية الفصل السابق، بصورة ما في الدول الأقل تطوراً إذا ما كان عليها أن تنمو اقتصادياً. والإحصائيات التي تبين ذلك تتحدث عن نفسها.

فمن بين 119 بلداً أرسلت تقارير إلى البنك الدولي في عام 1985 كانت 37 منها تضم أكثر من نصف سكان العالم وتتمتع بدخل فرد يقل عن 400 دولار وهو ما يعادل واحداً من ستين من معدل دخل الفرد الأميركي (الجدول 1.5). وهناك 23 دولة أخرى يقل دخل الفرد فيها عن 1000 دولار*. وبعبارة أخرى، فإن أكثر من نصف دول العالم وفيها ثلاثة أرباع البشر لها دخل فردي يقل عن واحد من خمسة عشر جزءاً من دخل الفرد في الولايات المتحدة. والحقيقة إن 32 بلداً فقط كان لها دخول فردية تتجاوز 3000 دولار، و19 منها كانت مصنِّعة تماماً. أما بقية هذه المجموعة فضمت دولاً مصدِّرة للنفط مثل الكويت وعُمان ودول صناعية ناشئة مثل هونغ كونغ وسنغافورا. ومع ذلك فالصورة واضحة ومعظم سكان العالم الآخرين فقراء جداً وفي بعض الحالات فقراء إلى حد اليأس. ومعظم ثروات العالم في أيدي قلة.

من غير المدهش أن نرى التباين في استهلاك الطاقة بين الدول الصناعية والدول الفقيرة يتشابه كثيراً (الجدول 1.5). ومن بين أفقر 37 دولة – وهي التي تدعى أحياناً أقل الدول تطوراً – كانت الصين أكبر مستهلك لكنها كانت لا تزال في عام 1985 تستهلك أقل من الولايات المتحدة بنحو 92 في المئة. غير أن الصين التي تمتلك قاعدة صناعية نامية ليست مثالاً جيداً للدول الأقل تطوراً. والأمثلة الأحسن نجدها في دول مثل مالي أو أثيوبيا أو نيبال حيث استهلاك الفرد من الطاقة التجارية لا يبلغ واحداً من

* لقد تغيرت الصورة بدرجة كبيرة منذ كتب هذا الكتاب. ويمكن الرجوع إلى الإنترنت حول هذا الموضوع لتعذر وضع جداول إحصائية طويلة هنا.

الجدول 5-1: دخل الفرد واستهلاك الطاقة في خمس وعشرين دولةً

	الدخل القومي الإجمالي (للفرد)		استهلاك الطاقة (للفرد)	
	دولارات	نسبة النمو (٪)	معادل للنفط (كغم)	نسبة النمو (٪)
القطر	1992	1980 - 92	1992	1980 - 92
الموزامبيق	60	-3.6	32	-4.6
النيبال	170	2.0	20	8.4
الهند	310	3.1	235	6.8
نيكاراغوا	340	-5.3	253	2.5
الصين	470	7.6	600	5.1
زيمبابويه	570	-0.9	450	5.3
إندونيسيا	670	4.0	303	7.2
بوليفيا	680	-1.5	255	0.6
السنغال	780	0.1	111	0.3
المغرب	1,030	1.4	278	3.7
رومانيا	1,130	-1.1	1,958	-1.8
جامايكا	1,340	0.2	1,075	3.4
تركيا	1,980	2.9	948	5.3
البرازيل	2,770	0.4	681	3.9
بوتسوانا	2,790	6.1	395	2.9
المكسيك	3,470	-0.2	1,525	3.1
البرتغال	7,450	3.1	1,876	4.9
العربية السعودية	7,510	-3.3	4,463	5.5
نيوزيلندا	12,300	0.6	4,284	4.7
سنغافورا	15,730	5.3	4,399	6.7
كندا	20,710	1.8	7,912	1.6
الولايات المتحدة	23,240	1.7	7,668	1.2
السويد	27,010	1.5	5,395	1.6
اليابان	28,190	3.6	3,586	2.6
سويسرا	36,080	1.4	3,694	2.0
ملخص لـ 132 دولة (المستوى المتوسط بحسب مجموعة الدخل)				
دول دخل منخفض	370*	1.2	151	5.2
دول دخل متوسط	2,490	-0.1	1,812	9.0
دول دخل عال	22,169	2.3	5,101	1.5

* يستثنى من ذلك الصين والهند، وإذا ما أدرج هذان البلدان فسيرتفع الدخل إلى 390 دولاراً، لكن النسبة ستزداد إلى 3.9 في المئة، وسبب هذا التغير الكبير هو النمو السريع للصين.

المصدر: The World Bank, World Development Report, 1994.

ثلاثمئة مما يستهلكه الفرد في الولايات المتحدة. وتستهلك أفقر الدول ما معدله نحو 0.5 مليون وحدة حرارية بريطانية للفرد سنوياً فقط، ويقل هذا عن 2 في المئة من الطلب للفرد الواحد في الولايات المتحدة.

غير أن هذه الأرقام في الحقيقة يجب أن تكون محددة بمدى معين. فهي تمثل استهلاك الطاقة التجارية – الوقود الأحفوري والكهرباء وما إلى ذلك. هناك العديد من الدول الأقل تطوراً تستهلك مقادير كبيرة من الطاقة من مصادر غير تجارية. فالعديد من الناس يستخدمون للتدفئة والطبخ الخشب وقوداً يجمعونه ولا يشترونه. ويحرق الآخرون مواد أخرى قابلة للاحتراق كروث الحيوانات، وهذا أيضاً يُستحصل من دون ثمن لذا فهو خارج أسواق الطاقة. نتيجة ذلك يصعب تثبيت استهلاك الطاقة الفعلي في العديد من الدول. وقد أشارت الدراسات مع ذلك إلى أن المصادر غير التجارية توفِّر 98 في المئة من استهلاك الطاقة. وهذا ما يضيّق الفجوة من ناحية واحدة ـ الطلب الكلي على الطاقة ـ بين الغني والفقير رغم أن الدول الفقيرة لا تزال بعيدة في استهلاكها للطاقة عن الدول الصناعية. فبنغلاديش مثلاً تحصل على 70 في المئة من استهلاك الفرد من مصادر غير تجارية، لكن تلك الدولة لا تزال تستهلك أقل من واحد بالأربعين من كمية الطاقة لكل شخص مقارنة بالدول الصناعية.

مع ذلك، في الحقيقية، الاعتماد على مصادر غير تجارية للطاقة أبعد من أن تسد الفجوة بين الغني والفقير، بل إنه يؤكدها، ويشير لماذا يجب أن ينمو الطلب على الطاقة التجارية التقليدية في الدول الأقل تطوراً. وتستهلك المصادر غير التجارية للطاقة في أغلبية الحالات بصورة غير كفوءة وذلك باستخدام أكثر أنواع التكنولوجيا بدائية (Goldemberg, [et al.], 1987). فالخشب وبقية أنواع الوقود النباتية (والتي تُدعى كلها وقود الكتلة الحيوية. انظر الفصل 11) يمكن أن تدير سيارة أو محطة قدرة كهربائية. غير أنه يجب أن يحول الخشب إلى كحول مثلاً في الحالة الأولى ويحتاج محرك الاحتراق الداخلي إلى تحوير لكي يتم استخدامه. والتكنولوجيا الناتجة من ذلك أكثر كلفة من السيارات العاملة بالبنزين اليوم.

والتكنولوجيات التقليدية لمحطات القدرة أو للمعالجة الصناعية ما زالت مهيأة في أغلبيتها للعمل بأنواع الوقود الأحفوري. لذا فبالإمكان استخدام الخشب لكنه سيحتاج إلى صناعات كاملة جديدة مع استثمارات هائلة في تقنيات جديدة ومعدات

رأسمالية ـ وهي استثمارات لا تستطيع الأمم الفقيرة تحملها. ومن الممكن القول إن السيارات والتصنيع على نطاق واسع ليسا مطلوبين من قبل كل دولة. لكن التكنولوجيا الحالية للإنتاج الزراعي أو لاستخراج المواد الخام تعتمد على مصادر الطاقة التجارية قدر اعتماد المعامل الصناعية. ولا يمكن لبلد من دونها أن يتنافس في الأسواق العالمية على أي سلع أو خدمات مع دول تستخدم التكنولوجيا الحديثة. ومن المتوقع أن يكون النمو الاقتصادي في هذه الدول الأكثر فقراً بطيئاً، أو غير موجود من غير ولوج الأسواق العالمية. ورغم أن الدخل واستخدام الطاقة ليسا مرتبطين مطلقاً، هناك بعض الشك في أن نمو الدخل في البلدان الفقيرة يحتاج إلى زيادات مهمة في استهلاك الطاقة.

وعلى الرغم من ذلك، فإن النمو المتوقع للطلب على الطاقة التجارية في الدول الأقل تطوراً يحمل معه مضامين مقلقة. دعنا ننظر في الآتي: كانت نسبة نمو الطلب في البلدان الثلاثة والسبعين الأفقر خلال الفترة بين عامي 1965 و1985 نحو 4 في المئة سنوياً. وإذا تصورنا نسبة نمو تبلغ 3.5 في المئة سنوياً للطلب على الطاقة (التي كانت نموذجية خلال سنين السبعينيات) لكافة الدول الأقل تطوراً حتى عام 2020 مع أخذ نسبة الزيادة السكانية الحالية سيبقى معدل الاستهلاك للفرد الواحد فقط حوالى ثلث استهلاك العالم الصناعي في أوائل الثمانينيات. لكن هذا يعني زيادة تبلغ سبعة أضعاف ونصف الضعف من مجموع استهلاك دول العالم الثالث. والاستهلاك الإضافي في الطاقة للدول الأقل تطوراً وحدها سيكون أكثر مما استهلكه العالم كله عام 1980.

إن توفير موارد الطاقة لهذا المستوى من الطلب سيجهد هذه الموارد من دون شك. ومع ذلك فحتى مع الافتراض أن الموارد ستكون متوافرة إلا أن المضامين المالية وحدها مذهلة. فحتى مع نسبة نمو سنوية أقل أي بحدود 2.5 في المئة قدر البنك الدولي عام 1983 أن الاستثمارات يجب أن تكون هائلة. ولا يقتصر الأمر على صرف مليارات الدولارات من قبل إحدى الدول الأقل تطوراً على معدات طاقة – محطات طاقة جديدة مثلاً – بل عليها أن تنفق ملايين أخرى كل عام على مصادر الطاقة. وقد قدر البنك الدولي أن أي دولة أقل تطوراً يحتاج أن يصرف ما يتجاوز مستوى دخله من الصادرات (على مستوياتها الحالية) بنحو 15 في المئة على مصادر الطاقة (Goldemberg, [et al.], 1987)، ويجب التوكيد أن المال المستحصل من

الصادرات يمثل مدخولاً ذا أهمية للدولة الأقل تطوراً. ففي التجارة الدولية يجري الدفع بعملات الدول الصناعية أو ما تدعى بالعملات الصعبة. وعملات الدول الأقل تطوراً غالباً ما تكون قيمتها قليلة خارج حدود أوطانها. وإذا ما أرادت هذه الدول تكنولوجيا جديدة وجب عليها دفع قيمتها بالدولار الأميركي أو الين الياباني أو بعملة أحد الدول الصناعية الأخرى. وإذا ما أرادوا تنفيذ مشروع تنمية رئيس يتطلب شركة إنشاءات من الولايات المتحدة أو اليابان أو أوروبا الغربية فعليهم الدفع بإحدى عملات الدول الصناعية. وإذا ما أرادوا الاستدانة فعليهم الاستدانة بالدولار أو اليَنْ، وعليهم دفع الفائدة والأصول بالعملة نفسها. وإذا ما أرادوا شراء النفط أو الغاز أو الفحم أو حتى القدرة الكهربائية من بلد آخر فعليهم أن يدفعوا بالعملة الصعبة. وعلى الدول الأقل تطوراً لغرض الحصول على العملات الصعبة أن تبيع منتوجها في الأسواق العالمية وبخاصة في أسواق الدول الصناعية. وفي ما عدا المساعدة الخارجية المباشرة من القوى الصناعية أو من مصادر صغيرة أخرى مثل السياحة تبقى الصادرات الطريقة الوحيدة للحصول على العملة الصعبة وهي أساسية للتطور. وإذا ما احتاجت مصادر الطاقة وحدها إلى ما يزيد بخمسة عشر في المئة على ما يكسبه البلد من مدخوله من الصادرات (ويمكن أن يزيد على ذلك إذا ارتفعت أسعار الطاقة نتيجة زيادة الطلب) فستكون هناك مبالغ أقل من العملة الصعبة لبناء المعامل والإسكان وللتنمية بصورة عامة. وسيكون الاستثمار في تكنولوجيات الطاقات المتجددة مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الريح أو الطاقة الكهرومائية صعباً جداً أيضاً لكونها كثيفة الحاجة إلى رأس المال.

والنسبة المئوية من مدخول الصادرات المطلوبة لموارد الطاقة تمثل عبئاً ثقيلاً في معظم الحالات. وتصرف الدول الفقيرة الآن على المعدل ما يساوي حوالى 33 في المئة من مدخولها من الصادرات على مصادر الطاقة. لكن هذا الرقم لا يعكس المشكلة بصورة كاملة لأن بعض الدول النامية مثل الصين لديها ما يكفي من مصادر وطنية بحيث يندر أن تقوم بالاستيراد. وفي الوقت ذاته تنفق ثمانية من أفقر الدول ودول عدة نامية أخرى أحسن حالاً بقليل ما يربو على 40 في المئة من مدخول صادراتها على مصادر الطاقة التجارية وتصرف بعضها ما يربو على 50 في المئة. إن عبئاً إضافياً بحدود 15 في المئة أمر لا يطاق، لكن 15 في المئة ليس إلا معدل. وهناك دول عدة قد تحتاج إنفاق كل مدخول صادراتها تقريباً على تجهيزات الطاقة.

وقد لا يزداد الطلب على الطاقة بالطبع بنسبة 2.5 في المئة سنوياً. وربما تتيح التحسينات التقنية في الكفاءة نفس مستوى التطور بمتطلبات أقل كثيراً من الطاقة وباستثمارات قليلة نسبياً؛ وذلك إذا ما حصلت الدول الأقل تطوراً على منفذ إلى أكثر التكنولوجيات كفاءة. ومن الممكن أيضاً أن أقطاراً أكثر – مثل الصين – قد تستطيع استثمار مصادرها الأهلية وبذلك ستصرف مبالغ أقل من مردودات تصديرها في حين تتزايد استخدامات للطاقة. وقد تتناقص تجهيزات بعض أنواع الوقود الأحفوري، لكن ذلك لا يعني كما سنرى أن مصادر الطاقة للدول النامية كافة تستغل بصورة كاملة.

تجهيزات الطاقة العالمية

كلما ازدادت إمكانية اعتماد الدولة الأقل تطوراً على حاجاتها للطاقة في مصادرها الأهلية كان حالها أفضل، ويمكن أن تصرف العملة الصعبة على المعدات الرأسمالية بدل النفط والغاز. وقد حفزت أزمة الطاقة في السبعينيات عدداً من الدول مع شركات الطاقة الدولية على البحث عن المزيد من الوقود الأحفوري. وجرى اكتشاف مصادر أهلية في مواضع لم يفكر أحد سابقاً في النظر إليها. غير أن التفكير في إمكانيات التجهيز المحلي ينبغي ألا نحدد المصادر الأهلية على الوقود الأحفوري. ومن الصحيح أن مثل هذه الأنواع من الوقود تعد في الظروف الحالية حاسمة في ضوء التقنية المعاصرة، والأرجح على الدول التي لا تمتلك مصادر أحفورية أن تعتمد على أسواق الوقود الأحفوري العالمية. ويمكن للمصادر الأخرى للعالم النامي أن تساهم في الوقت ذاته وبصورة متميزة في الاكتفاء الذاتي للطاقة محلياً.

أسواق الوقود الإحفوري العالمية وتجهيزاته

النفط العالمي

يعتبر النفط الوقود المهيمن على مستوى الاستخدام العالمي اليوم. فنحو 39 في المئة من كل الوقود التجاري من أساس نفطي. وقد ساعدت التجهيزات المتزايدة والأسعار المنخفضة بعد الحرب العالمية الثانية النفط على تبوّئه مركز الصدارة، لكنه حقق سيطرته واحتفظ بها لأسباب أخرى أيضاً. فهو سهل النقل والتخزين. وقد كان

الوقود الملائم تقنياً لأسلوب النقل بالسيارات. ومع اكتساب السيارة أهمية أكبر عالمياً. كذلك كان حال النفط. ومع بدء أزمة الطاقة كان النفط يشكل 48 في المئة من سوق الوقود العالمية التجارية. وكان النفط والمنتجات ذات الأساس النفطي في ذلك الحين قد أصبحت أساس السلع الرئيسة في الحياة الحديثة. ولم يكن هناك بلد في العالم من دون بعض الحاجة إلى النفط، وكان العالم برمّته تقريباً يتأثر بتقلبات سوق النفط.

كان إنتاج النفط عالمياً يبلغ 58 مليون برميل في اليوم (وهو ما يعادل 21 مليار برميل/ السنة) عام 1973. ورغم الأسعار المتزايدة قفز الإنتاج إلى 65 مليون برميل في اليوم أواخر السبعينيات. وكما يحتمل أن نتوقع فإن جزءاً كبيراً غير متناسب من هذا استهلك من قبل الدول الصناعية – أكثر من 65 في المئة. واستهلكت دول المعسكر الشرقي ـ الاتحاد السوفياتي وأوروبا الشرقية ـ نحو 16 في المئة بينما استهلكت الدول الأقل تطوراً (ما عدا الصين) نحو 16 في المئة. وهبطت أسعار النفط بالطبع بعد 1982 وهبطت كذلك حصة النفط من الطلب العالمي على الطاقة. ومع ذلك، فإن النسبة ظلت عند 40 في المئة في منتصف الثمانينيات. واستمر الطلب بالتزايد في الدول الأقل تطوراً، في حين تناقص في الدول الصناعية، رغم أن الأخيرة كانت لا تزال تستهلك من النفط ما يزيد على استهلاك بقية العالم مجتمعاً.

ورغم أن الطلب ذو طبيعة شاملة إلا أن التجهيز ليس كذلك. (انظر الجدول 5-2). ويشكل أعضاء أوبك أكبر مجموعة من الدول المنتجة للنفط. فرغم كونها مجموعة صغيرة من الدول غير الصناعية إلا أن أوبك أنتجت نحو 30 مليون برميل في اليوم (11 مليار برميل/ السنة)، أو ما يقارب 50 في المئة من إنتاج العالم اليومي، وذلك أواخر عقد السبعينيات. وعلى أي حال فقد تناقص الطلب بحلول عام 1984 وزاد الإنتاج خارج أوبك، ما أنهى سيطرتها على الأسواق وهبطت النسبة المئوية التي تُنتج يومياً بصورة حادة بينما ارتفع الإنتاج في بقية أرجاء العالم ببطء. وقد استمرت هذه الحالة خلال ما تبقى من عقد الثمانينيات.

وتتركز دول أوبك بصورة كبيرة في الشرق الأوسط كما يمكن رؤية ذلك من جدولة إنتاج النفط (الجدول 5-2) رغم أنها تضم أيضاً نيجيريا وفنزويلا. ويمكن

الاطلاع على تركيز الموارد في دول أوبك الذي تعكسه إحصائيات الإنتاج هذه في الجدول 5-3. ويمتلك الشرق الأوسط أكبر كمية من الاحتياطي ومن الموارد القابلة للاستخراج من بين المناطق الأخرى كافة. وسنبحث في المترتبات الفلسفية لمثل هذا التوزيع للثروة في هذا الفصل لاحقاً، لكننا سننظر هنا في الأثر العميق الذي يتركه في أسواق النفط العالمية.

وبينما تحكمت أوبك بالإنتاج العالمي قامت بصورة فعلية بتحديد أسعار النفط وبمضاعفتها طبعاً عدة مرات. وكان لتحكم أوبك بالأسواق تأثير عميق في الدول الصناعية وساهم بصورة كبيرة في التضخم المالي والركود في تلك الدول وحفزها على الحفاظية. لكن تأثير سيطرة أوبك على سوق النفط كان أكثر إثارة في الدول النامية – أكانت مصدرة للنفط أو مستوردة.

كان هناك أولاً انتقال كبير للثروة إلى الدول المصدرة. فقد أصبحت بعض الدول الأقل تطوراً فجأة غنية جداً مكدسة كميات كبيرة من النقد الذي سمي (دولارات النفط (Petrodollars)). وخصصت الدولارات في بعض الدول مباشرة لمشاريع التنمية لإنجاز التحول من الفقر إلى الغنى الدائمي. ولتسريع المهمة لم يقتصر الأمر لدى بعض الدول المصدرة على صرف دولارات النفط فقط بل قامت بالاستدانة الكبيرة على توقع استمرارية ارتفاع أسعار النفط وتوقع مليارات أخرى من دولارات النفط. وكانت البنوك في الدول الصناعية سعيدة بتقديم القروض بناء على هذه التوقعات.

وعانت في الوقت نفسه الدول الفقيرة المستوردة للنفط، حيث إن فواتير الطاقة ابتلعت نسبة عالية من مدخولات صادراتها. واقترضت في العديد من الحالات أيضاً إما لتطوير موارد الطاقة المحلية أو لتطوير صادراتها لتسديد كلف الطاقة المتزايدة. ورغم معاناتها بسبب أسعار النفط المرتفعة إلا أنها اعتمدت على استمرارية التضخم العالي التي ساعدت أسعار النفط المرتفعة على توليده. وقد أدى التضخم إلى زيادات في أسعار السلع كافة ولأن العديد من الدول النامية خارج الأوبك صدّرت سلعاً أخرى – معادن ومنتجات زراعية أيضاً – فقد أملت بأن تزيد الأسعار المتزايدة من مدخولها وتساعدها في الإيفاء بديونها.

الجدول 5-2: إنتاج النفط العالمي الخام 1973 – 1993 (ملايين البراميل يومياً)

	1973	1983	1993
الدول المصدرة للنفط	31.1	18.5	23.5
العربية السعودية	7.6	4.9	8.1
إيران	5.9	2.4	3.4
فنزويلا	3.4	1.8	2.3
إندونيسيا	1.3	1.4	1.3
نيجيريا	2.0	1.3	1.9
الإمارات العربية المتحدة	1.5	1.1	1.8
العراق	2.0	1.1	0.4
ليبيا	2.2	1.1	1.5
الجزائر	1.1	1.0	0.8
الكويت	3.0	1.1	0.9
عمان	0.3	0.4	0.7
قطر	0.6	0.3	0.4
منتوج الغاز الطبيعي المسال	0.3	0.6	0.6
دول نامية أخرى			
صافي صادرات النفط	2.8	7.5	8.6
المكسيك	0.5	3.0	2.7
الصين	1.1	2.1	2.8
مصر	0.2	0.7	0.9
ماليزيا	0.1	0.4	0.7
دول أخرى	0.9	1.3	1.5
صافي استيراد النفط	1.5	2.1	2.3
الأرجنتين	0.4	0.5	0.6
البرازيل	0.2	0.3	0.6
الهند	0.1	0.5	0.5
رومانيا	0.3	0.2	0.1
آخرون	0.5	0.6	0.5
الدول الصناعية	13.8	15.6	13.2
الولايات المتحدة	11.0	10.3	7.2
كندا	2.1	1.6	1.6
المملكة المتحدة	–	2.3	1.9
النرويج	–	0.6	2.1

يتبع...

تابع...

أستراليا	0.4	0.4	0.0
آخرون	0.3	0.4	0.4
دول أخرى	9.1	12.7	9.3
الاتحاد السوفياتي السابق	8.6	12.4	8.9
آخرون	0.5	0.3	0.4
المجموع الكلي	58.3	56.4	57.5

المصدر: The World Bank (1985), Oil and Gas Journal Data, 1994.

الجدول 3-5: احتياطيات وموارد العالم من النفط الخام بمليارات البراميل = 10^9 برميل كما كانت عام 1994.

المنطقة	*R*	$Q_\infty - Q_d$
أميركا الشمالية	112.0	90.3
أميركا الجنوبية	77.6	43.7
أوروبا	43.2	17.4
الاتحاد السوفياتي السابق	125.1	100.0
أفريقيا	76.5	37.7
الشرق الأوسط	597.2	117.4
آسيا/ أوقيانيا	71.2	53.2
المجموع العالمي	1103.2	*470.7

* استناداً إلى Q_∞ =2.273 مليار برميل.

المصدر: USGS, 1994.

إذاً، كانت الدول الأقل نمواً المصدرة والمستوردة تعتمد على استمرار الأسعار العالية والتحكم بالسوق من قبل أوبك. لكن فقدان أوبك السيطرة على السوق والسياسات الاقتصادية في الدول الصناعية التي كبحت التضخم تآزرتا لتصيبا مصدري النفط ومستورديه بالأذى على حد سواء. ومن البدهي أن الدول التي لم تقترض بصورة واسعة (مثل الكويت) لم تتأثر إلا هامشياً. لكن المقترضين بمن فيهم أعضاء في الأوبك مثل نيجيريا وفنزويلا، فضلاً عن دول عديدة خارج أوبك، عانت

أيضاً. وقد امتصت الديون الموارد المالية لعديد من الدول بحيث أعيق النمو. ووضعت الدول برامج تقشفية خفضت من مستوى معيشة السكان المنخفض في الأصل والتي لم تكن كافية مع ذلك لتوليد دخل كافٍ لدفع خدمة الدين[1]. ولم يكن بمقدور الدول إعادة دفع ما اقترضته وليس على وجه التأكيد حسب الشروط التي قبلت بها حين اقترضت المال. لذا نشأت نتيجة ذلك أزمة مالية عالمية استمرت خلال عقد الثمانينيات. وأثرت الأزمة في الدول الصناعية أيضاً. فرغم تمتعها بصورة عامة بالرخاء خلال الفترة إلا أنها كانت أصحاب هذه القروض واستمرت المشكلة تهدد استقرار النظام المصرفي العالمي. وكانت الدول الصناعية في نهاية الثمانينيات لا تزال مهتمة بإيجاد حلول، وكانت تفكر بالتسامح بما يزيد على 100 مليار دولار مطلوبة من الدول الأشد فقراً في أفريقيا والتي كانت ديونها للمصارف الخارجية والدول الأخرى تفوق إجمالي الناتج القومي المحلي.

ومع أن الدول الصناعية كسبت اليد العليا على أوبك في الثمانينيات إلا أن انتصارها ربما كان قصير الأمد. إذ إن أوبك تبقى كما رأينا في الفصل الثاني أكبر مجموعة من المنتجين الممكنين مع أكبر هبة طبيعية من النفط. ورغم أنها لا تتحكم بالسوق إلا أن أوبك ما زالت حجر الرحى في تجارة النفط. ويتوقع أن تتركز تلك التجارة على وجه الخصوص في منطقة الخليج العربي حيث تحمّل الناقلات العملاقة بالنفط الخام لتسليمه إلى الأسواق وغالبها في العالم الصناعي. وطالما استمرت حاجة العالم الكبيرة للنفط، فإن أوبك قد تكون في موقع يتيح لها إعادة تأكيد سيطرتها على التجهيز والسعر ثانية مع تأثيرات عميقة في طول العالم وعرضه.

هذا التوقع بالنسبة إلى الدول الأقل تطوراً غير المصدرة مثبط للهمم. ومن غير المرجح وجود اكتشافات نفطية رئيسة جديدة في الدول غير المنتجة. وستكون الدول غير المصدرة النامية تحت رحمة أوبك مع الدول الصناعية تبعاً لمقدار اعتمادها على النفط. في الماضي فكر أعضاء أوبك في تخفيف تأثير ارتفاع الأسعار على أفقر الدول ـ إما من خلال برامج العون أو من خلال بيع النفط بعقود خاصة

1 كانت هذه البرامج التقشفية غالباً قد طلبت من قبل صندوق النقد الدولي (IMF) الذي حاول في الثمانينيات فرض استراتيجيات تعمل على حل مشكلة الديون. غير أن العديد من برامج التقشف تفتت نتيجة للضغوط داخل الدول النامية ومع ذلك لم يجر حل أزمة الديون.

وبأسعار منخفضة. لكن الأسعار تدهورت على أي حال ولم تخضع أوبك للاختبار. يمكن لتجدد رفع الأسعار كما في حدث في السبعينيات ومن دون مصادر طاقة بديلة أو اعتبارات سعرية خاصة أن تشل الدول المستوردة في العالم النامي.

الفحم في العالم

رغم أن النفط هو أكثر أنواع الوقود الأحفوري استخداماً إلا أن الفحم هو أكثرها توفراً. وقد لاحظنا في الفصل الثاني أن موارد الفحم الكلية في العالم تبلغ مليارات الأطنان. لكننا نستطيع أن نقارن حجم موارد النفط والفحم من خلال رؤيتها بمنظار كمية الطاقة مثلاً عدد وحدات BTU ـ المستحصلة من كليهما. وعلى هذا الأساس يمكن أن نعتبر طن الفحم مساوياً لعدد معين من براميل النفط. وقد حول فحم العالم في الجدول 4-5 إلى مليارات البراميل النفطية المعادلة (BBOE) ونستطيع أن نرى بوضوح في هذا الجدول أن الفحم يمثل أكبر مصدر للوقود الأحفوري. ويمتلك معادلاً للطاقة يزيد بنحو خمس مرات أضعاف النفط عندما يقاس كاحتياطي (R) و40 مرة أكبر تقريباً عندما يقاس كموارد (مقدرة) باقية غير مكتشفة (Q_{∞}-Q_d). ورغم ذلك، فإن الفحم يستخدم أقل من النفط بكثير مع نسبة R/P تزيد على مثيلتها للنفط تسع مرات.

هناك عدد من الأسباب وراء محدودية استهلاك الفحم، رغم أنه أرخص أنواع الوقود الأحفوري. وقد خسر الفحم المعركة مع النفط تاريخياً والسبب الأول هو سهولة شحن النفط وسهولة استخدامه في مكائن الاحتراق الداخلي. كذلك أزاح الغاز الطبيعي عندما دخل الاستخدام بصورة واسعة الفحم في العديد من الاستخدامات الصناعية. وقد تباطأ أي توجه لاستخدام الفحم في السنين الأخيرة بسبب الاهتمام بانبعاث غازات البيت الزجاجي (انظر الفصل السادس). ويعتبر الفحم أكبر مصدر لانبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون (وهو غاز البيت الزجاجي) لكل وحدة حرارية ناتجة من بين أنواع الوقود الأحفوري كافة لأنه يمتلك أكبر نسبة من الكربون في تركيبته. ومع الوعي المتزايد عن التغير المناخي المحتمل حدوثه الناجم عن الحرارة الكونية للبيوت الزجاجية بدأ البيئيون وبعض الحكومات بشن حملات ضد انبعاثات الكربون شكّل الفحم الهدف الرئيس فيها. ورغم ذلك يبقى الفحم أحد الموارد المهمة في أنحاء العالم كافة وبخاصة في أجزاء من العالم النامي.

وتوزيع مصادرالفحم في العالم، كما في حالة النفط، مسألة مهمة بقدر مجموع الكميات الكبيرة، غير أن أكبر كميات تجهيز لهذا المورد ليست في هذه الحالة في الدول الأقل تطوراً، بل إنها في الولايات المتحدة وفي أقطار الكتلة الشرقية وبخاصة الاتحاد السوفياتي وبولندا (الشكل 1.5). وتمتلك أفريقيا الجنوبية وأستراليا وألمانيا تجهيزات وافرة أيضاً. لكن ليس هناك الكثير من الفحم في الدول النامية. الصين فقط تمتلك تجهيزات كبيرة، أما الهند فلديها بعض التجهيزات لكنها صغيرة نسبياً مقارنة بأي من منتجي الفحم الرئيسيين الآخرين.

ويبين الجدول (5-5) تحليلاً أكثر تفصيلاً لمصادر الفحم للدول النامية. ويمكننا أن نرى هنا امتلاك عدد من الدول بعض التجهيزات المحلية الصغيرة على الأقل. فهناك في أميركا الجنوبية مثلاً بعض الفحم، رغم أن أغلبيته موجود في دولتين وهما كولومبيا والبرازيل. وهناك بعض الاحتياطي المثبت في آسيا وذلك في بنغلاديش وإندونيسيا.

الجدول 5-4: الفحم في العالم مقارنة بالنفط والغاز الطبيعي

مقاييس المورد (أ)	موارد الفحم في العالم		موارد النفط في العالم	موارد الغاز الطبيعي في العالم
	وحدة Bmt	BBOE	$BBl = 10^9 BBl$	BBOE
الإنتاج السنوي(P)	Bmt/y 2.45	BBOE/Y 11.7	BB/y 21	BBOE/y 8.3
الاحتياطي (R)	Bmt 663	BBOE3160	BB*l* 700	BBOE 425
نسبةR/P	270 سنة	270 سنة	33 سنة	52 سنة
الاحتياطي القابل للاستخراج (Q_∞)	Bmt 5380	BBOE 25600	BB*l* 1863	BBOE*1*200
الموارد المتبقية (Q_∞-Q_d)	Bmt 4610	BBOE 22000	BBl 1153	BBOE 775

(أ) انظر الفصل الثاني عن التعاريف الدقيقة.

المصدر: .Wilson, 1980, U.S.G.S. 1983, and Cambridge Energy Research Associates (1988)

الجدول 5-5: موارد الفحم في الأقطار النامية

المنطقة/ الدولة	الموارد القابلة للاستخراج mtc/y	الإنتاج mtc/y 1977	الإنتاج mtc/y 2000	الإحتياجات المستوردة mtc/y	إمكانيات التصدير mtc/y
الهند وإندونيسيا	12000	72	305	0	5
الصين	99000	373	1465	0	30
شرق وجنوب شرق آسيا	–	1	20	180–60	0
أفريقيا (الأقطار النامية)ج	6000	–	–	–	25
أميركا اللاتينية	11000	25ب	180ب	6–10ب	25
مجموع الأقطار النامية	>128000	471	1970	190–66	85

(أ) مليون طن متري من الفحم = mtc

= $12 - 24 \times 10^{12}$BTU

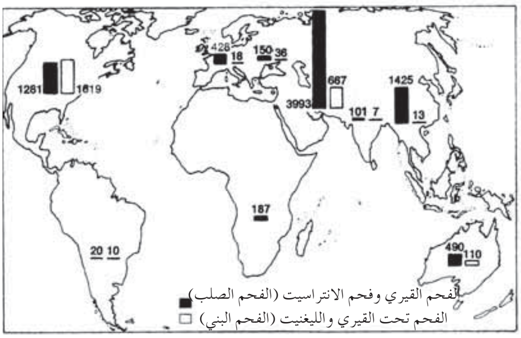
(تعادل طاقة كهربائية مقدارها 1×10^{6} kW-hr) = 1000 - 2500 Gw - hr =

ب ـ تشمل هذه الأرقام أفريقيا وأميركا اللاتينية مجتمعة

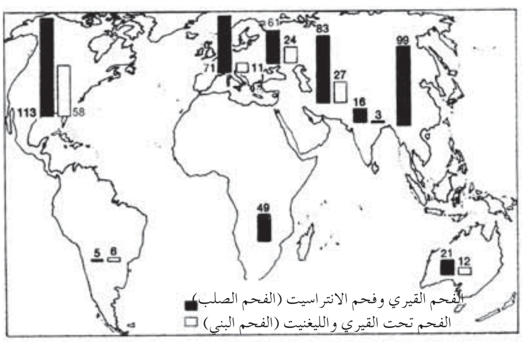
ج ـ الدول الأفريقية النامية. لا تشمل هذه الأرقام جمهورية جنوب أفريقيا.

المصدر: Wilson (1980). After Cassedy and Meier (1988)

موارد الفحم الجيولوجية في العالم (مليار طن من الفحم)



موارد الفحم الحجري المجدي استخراجها اقتصادياً في العالم (مليار طن من الفحم)



المصدر: WEC figures 1978 updated by WOCOL Country teams. Non – WOCOL countries updated by Bergbau – Forschung

موارد واحتياطي الفحم في العالم في الأقطار الرئيسية المصدرة للفحم (مليون طن متري)

الدولة	الموارد الجيولوجية	الاحتياطي الممكن استخراجه تقنياً واقتصادياً
أستراليا	600000	32800
كندا	323036	4242
جمهورية الصين الشعبية	1438045	98883
جمهورية ألمانيا الاتحادية	246800	34419
الهند	81019	12427
بولندا	139750	59600
جمهورية جنوب أفريقيا	72000	43000
المملكة المتحدة	190000	45000
الولايات المتحدة	2570398	166950
الاتحاد السوفياتي	4860000	109900
أقطار أخرى	229164	55711
المجموع العام	10750212	662932

الشكل 1.5: توزيع موارد الفحم في العالم. مقتبسة من.(1980) Wilson

ويبين الجدول رقم 5-5 أيضاً تقديرات الإنتاج والاستيراد والتصدير للدول النامية من موارد الفحم. وفيما عدا الصين والهند، مثّل إنتاج الدول النامية واحداً في المئة فقط من الإنتاج العالمي. لكن إسقاطات إمكانيات الإنتاج مدهشة، ولا ينحصر ذلك في الزيادات المتوقعة في الهند والصين فقط بل في أفريقيا وأميركا اللاتينية أيضاً. وتمتلك كل هذه المناطق إمكانية زيادة استغلال موارد الفحم بصورة متميزة. ويمكن أن يصل الإنتاج مع هذه الزيادات إلى مستويات ذات شأن بالمقاييس العالمية للمرة الأولى في التاريخ. ولما كان استبدال الفحم بالنفط والغاز لتوليد الطاقة الكهربائية وللاستخدامات الصناعية أمراً ممكناً لذا يمكن أن يكون مصدراً رئيساً للطاقة إذا ما تحققت الأهداف الإنتاجية وسيقلل ذلك من اعتماد هذه الدول على سوق النفط. ويمكن للفحم في الحقيقة أن يوفر نسبة كبيرة من متطلبات الوقود لتحقيق النمو في الدول ذات الموارد المحلية. كما إن التجارة الدولية في الفحم بين الدول النامية كانت موضع تفكير (انظر العمود الأخير ـ إمكانيات التصدير في الجدول 5-5)، وأيضاً (انظر: Cassedy and Meier, 1988).

ويمكن أن يزود الفحم حصة أكبر من متطلبات الطاقة في الدول المحرومة من

الموارد. كانت هناك تجارة فحم دولية متنامية يمكن أن تنافس تجارة النفط في نهاية الأمر. غير أنها تقلصت في حقبة ما بعد الحرب العالمية الثانية وقبل أزمة الطاقة وهي بحاجة إلى كثير من السنين لتتطور. وأعلنت دراسة أجرتها (WOCOL, 1980) أن مثل هذه التجارة عملية ويمكن أن تقدم للدول المستوردة وقوداً بأسعار تقل كثيراً عن أسعار النفط. ولا يوجد في هيكل تجارة الفحم المستقبلي إلا القليل الذي يشجع على تكوين كارتيل مثل الأوبك، ويكفي في هذا الخصوص هيمنة احتياطيات الولايات المتحدة والاتحاد السوفياتي اللذين لا يربحان الكثير من خلال تكوين كارتيل. ومع ذلك، قد لا ترغب الدول المتطورة حديثاً في اعتماد الفحم بصورة رئيسة لأن التحكم بهذا المورد يقع في أيدي الدول الصناعية، وسيعني الاعتماد على الفحم المستورد اعتماداً على الدول الغنية، وهو أمر قد لا يكون مقبولاً في دول كانت مستغَلة في الماضي غير البعيد من قبل الدول الصناعية نفسها (التي كانت استعمارية).

ومع ذلك فقد كانت واردات الفحم في ازدياد. وقد ازدادت تجارة الفحم من الولايات المتحدة وحدها بنحو الثلث خلال الثمانينيات مقارنة بالسبعينيات. وتبعاً لدراسة عن الفحم في العالم (Wilson, 1980)، فإن الصادرات من أربع دول فقط – الولايات المتحدة وكندا وأفريقيا الجنوبية وأستراليا – قد تتجاوز 400 مليون طن من الفحم في السنة (mtc/y). ويذهب الجزء الأكبر من تجارة الفحم إلى الدول الصناعية في أوروبا الغربية واليابان، لكن بعضها مخصص للدول النامية وبخاصة الدول الآسيوية ذات الاقتصاديات النامية سريعاً الواقعة على حافة المحيط الهادي مثل تايوان وكوريا الجنوبية التي يتوقع أن تكون المستورد الرئيس (وقد يبلغ استيرادها 180 مليون طن/ السنة). وتتوقع دراسة WOCOL أيضاً أن تزداد نسبة الفحم في مزيج الطاقة في دول أميركا الوسطى والجنوبية.

لكن تطوير تجارة الفحم على مجال واسع أمر يتطلب أكثر من الطلب واستثمار الموارد. فمصدِّر الفحم المتوقع يحتاج إلى استثمار ضخم في السكك الحديد والموانئ والسفن التي لا توجد الآن على مجال كبير وتحتاج إلى سنين طويلة لتطويرها. والأمر يشمل حتى الولايات المتحدة، التي تعتبر أكبر مصدِّر ممكن للفحم، إذ لم تقم بتطوير قدرتها التصديرية إلا ببطء وبصورة مترددة في مواجهة أسواق طاقة عالمية متغيرة باستمرار. إن زيادة تجارة الفحم العالمية بصورة شاملة غير مؤكد، فالبنية التحتية غير وافية والنمو على الطلب ضعيف.

الغاز الطبيعي في العالم

تؤلف موارد الغاز الطبيعي نحو ثُلث الوقود الأحفوري التقليدي في العالم. وهي مناسبة للاستخدام بطريقة تتميز فيها من الفحم في المنطقة أو القطر الذي تُنتج فيه. ويمكن أن تنقل بصورة اقتصادية في خطوط أنابيب عبر البلاد، إلا أن التصدير عبر البحار يتطلب تسييل الغاز (أي توليد الغاز الطبيعي المسيل LNG). وهذه الطريقة ليست فقط مكلفة، بل إنها تحتاج إلى سفن بحرية خاصة وتوجد اهتمامات جديدة في السلامة. فالغاز المسيل قابل للاحتراق والانفجار بدرجة يمكن فيها لحادثة أن تسوّي منطقة الميناء بالأرض*.

ورغم ذلك فربما يكون الغاز الطبيعي النوع الأكثر رغبة من أنواع الوقود الأحفوري، فهو يحترق بصورة أنظف من النفط أو الفحم، وله استخدامات متنوعة واسعة من تدفئة الفضاءات الداخلية، إلى التسخين في الصناعة، إلى توليد الكهرباء، وكمية غاز ثاني أكسيد الكربون الناجمة عن حرقه هي الأقل من بين أنواع الوقود هذه. ويمكن أيضاً أن يستخدم في الصناعات البتروكيميائية لتصنيع منتجات عضوية بما فيها السماد[2].

وموارد الغاز الطبيعي في العالم أصغر بكثير من حيث قيم المعادل الحراري للطاقة مقارنة بالفحم (انظر الجدول 5-4). ومع ذلك يتوقع أن تدوم الموارد المتبقية مع نسب الاستهلاك الحالية لمدة جيدة خلال القرن الحادي والعشرين، لكنها قد تبدأ تشح في وقت لاحق خلال القرن. وكما رأينا في الفصل الثاني يبدو من المتوقع أن يشابه المنحنى اللوجستي لإنتاج الغاز الطبيعي التقليدي في العالم مساراً مشابهاً للنفط.

ورغم الشُح المحتمل للغاز الطبيعي على مستوى العالم، إلا أن بعض الاحتياطيات الكبيرة الجديدة ما زالت تكتشف. فقد جرى تشخيص عدد من تراكمات الغاز الجديدة منذ وقت مبكر في الثمانينيات، والكثير منها في الدول النامية. وتوجد

---

* توجد الآن طريقة أخرى للاستفادة من الغاز الطبيعي بتحويله كيميائياً إلى سوائل نفطية من نافثا وكيروسين طائرات وزيت غاز وزيوت تزليق وتعرف الطريقة باسم (gas – to – liquids) أو GTL وتعطي منتجات ذات نوعية متميزة وهناك عدد من المصانع العاملة بهذه الطريقة الآن في العالم وبعضها في دولة قطر. هذه الطريقة تنافس الآن من حيث الكلفة طريقة التثليج LNG إلا أنها أقل خطورة وتعطى منتجات مختلفة قد تكون بعض الدول بحاجة إليها.

2 تصنّع الأسمدة النيتروجينية باستخدام الغاز الطبيعي كمادة تغذية ويوفر الغاز الطبيعي مصدراً رخيصاً للهيدروجين للتفاعل مع البخار الذي يقوم بتثبيت النيتروجين اصطناعياً من الهواء مشكلاً الأمونيا أولاً (NH_3) ثم بقية مركبات النيتروجين.

تراكمات الغاز الطبيعي الآن في خمسين من الدول النامية، مع إن حجم هذه الاحتياطيات يحتاج إلى تحديد دقيق. ومع ذلك قد تكون هذه الموارد ذات أثر حاسم في التطور الاقتصادي في دول عدة.

ويبين الجدول 5-6 توزيع الغاز الطبيعي في العالم، كما يعطي الجدول 5-7 تحليلاً لهذه الموارد في العالم النامي. يمتلك الشرق الأوسط والاتحاد السوفياتي السابق كما نرى، الجزء الأكبر من الغاز الطبيعي، كما يمتلك معظم النفط. ومعظم هذا الغاز مرتبط بالنفط، أي إنه يوجد في التراكمات الجيولوجية نفسها مثل النفط، ويهرب حين يستخرج النفط. وتدعى احتياطيات الغاز الموجودة بصورة مستقلة عن النفط بالغاز غير المصاحب. وقد اكتشفت تراكمات للغاز غير المصاحب في أماكن مختلفة مثل بوليفيا وبنغلاديش (Cassedy and Meier, 1985).

الجدول 5-6: موارد الغاز الطبيعي في العالم (تريليون قدم مكعب)

الدولة أو المنطقة	الاحتياطي		غير المكتشف	المجموع
	1978	**1995**	**1988**	**1988**
الولايات المتحدة	221	166	364	530
كندا	95	97	399	496
بقية نصف الكرة الغربي	121	260	367	627
أوروبا الغربية	140	205	193	398
أوروبا الشرقية	–	17	–	–
إيران	500	600	214	814
بقية الشرق الأوسط	198	755	911	1666
أفريقيا	183	306	445	751
آسيا/ الباسفيك	123	276	361	637
الاتحاد السوفياتي	875	1889	1582	3471
الصين	28	35	260	295
المجموع	2473	4606	5096	9685

المصدر: مقتبسة من .Petroleum Economist, 1979; IEA, 1991 and USEIA, 1995

وتوفِّر تراكمات الغاز الطبيعي المكتشفة حديثاً أمل الاكتفاء الذاتي من مصادر الطاقة ومسلكاً إلى التطور الاقتصادي لعدد من الدول الأقل تطوراً. فالغاز الطبيعي، بجانب امتلاكه عدداً من الاستخدامات، سهلُ الاستثمار والتطوير وذو كفاءة سعرية.

وقد لاحظ البنك الدولي أن الغاز الطبيعي يحتاج إلى تخصيصات رأسمالية أقل، ومن كافة مصادر الطاقة التجارية يمكن للغاز أن يستخدم بأكبر قدر من المعقولية ويوزع في الأسواق المحلية في الدول النامية التي تمتلك المورد[3].

أنواع الوقود الأحفوري التقليدية وغير التقليدية

توجد موارد الفحم والنفط والغاز الطبيعي في ترسبات منتشرة حول العالم. لكن هناك دولاً أكثر لا تمتلك هبة الموارد الطبيعية، أو تمتلك القليل منها فقط تفوق تلك التي تمتلكها بوفرة. ويأمل بعض المحللين في أن الدول التي لا تمتلك قد تكون قادرة على استغلال ما يدعى بموارد الوقود الأحفوري غير التقليدية. ويشمل هذا الصنف الغاز الطبيعي غير التقليدي والرمال القيرية ونفط السجّيل وكلها مفصلة في الملحق (ج). وجميع هذه مصادر غير تقليدية، لأن تقنية استكشافها وتقنيات استخراجها لم تطور بدرجة كافية لتسهّل إنتاجها على نطاق واسع وبكلفة تضاهي كلف إنتاج المصادر التقليدية (انظر الفصل الثاني). ولو كان بالامكان استغلال هذه المصادر بصورة كاملة لازداد التجهيز المتوفر من الوقود الأحفوري في العالم بصورة هائلة، ولكان التوزيع أكثر انتشاراً (انظر الجدول 5-8). غير أن السيناريو الآن افتراضي. فمن المهم إدراك أن الموارد قد تكون موجودة، إلا أنه لا يمكن استخراجها دائماً بطريقة مجدية سعرياً، وقد تمر سنوات، حتى لو بذلت جهود سريعة لتطوير تكنولوجيات جديدة (انظر الفصل العاشر). وإذا ما حاول بلد نامٍ استغلال المصادر غير التقليدية في الوقت الحاضر، فربما يعيق المشروع في الحقيقة نموه الاقتصادي بدل أن يحسنه. ومن الأجدى صرف الموارد المالية على بناء سعة تصنيعية أو زراعية أو على تحسين البنية التحتية للبلد. وإذا كان الأمر مرغوباً فيه أم لا فإن التقنيات المتقدمة يتوقع أن تأتي على الأغلب من الدول الصناعية، وهي في وضع أفضل في الإنفاق أكثر على البحث والتطوير. نتيجة لذلك ربما يتأثر اتجاه التطور التكنولوجي بموجب الطريقة التي يفهم العالم الصناعي بها متطلبات المستقبل. والهموم التي ظهرت في السنين الأخيرة حول البيئة والمناخ لن تشجع على الاستثمارات الثقيلة في مصادر الوقود الأحفوري البديلة، بل ستفضّل الاستثمار في الموارد المتجددة.

---

3 يجري بحث هذا المنظور في .The Energy Transation in Developing Countries, World Bank, 1983

الجدول :5-7 موارد الغاز الطبيعي في الدول النامية

المنطقة	القطر	الاحتياطيات القابلة للاستخراج R(TCF)[a] 1987	1995	الانتاج 1991 P(TCF/y)	1991 نسبة R/P (y)
آسيا/المحيط الهادي	بروناي	7.0	–	–	34
	الهند	17.6	37	0.6	66
	إندونيسيا	73.0	88	1.7	52
	ماليزيا	52.2	64	0.7	87
	باكستان	22.4	–	–	45
	الصين	30.7	35	–	70
	تايلندا	–	–	–	35
	بنغلاديش	12.6	–	–	153
	التقدير للمنطقة	215.5	276	–	64
الشرق الأوسط	أبوظبي	183.5	–	–	–
	البحرين	6.9	–	–	29
	إيران	489.4	600	0.9	621
	العراق	26.3	–	–	341
	الكويت	36.4	–	–	200
	قطر	156.7	–	–	590
	السعودية	139.9	129	1.2	111
	تركيا	–	–	–	–
	التقدير للمنطقة	1039.1	1355	–	279
أفريقيا	الجزائر	105.2	96	1.8	52
	مصر	10.2	–	–	34
	ساحل العاج	–	–	–	–
	ليبيا	25.7	–	–	102
	نيجيريا	84.0	–	–	110
	كاميرون	–	–	–	–
	المغرب	–	–	–	50
	تونس	–	–	–	110
	تنزانيا	–	–	–	–
	زائير	–	–	–	–
	التقدير للمنطقة	225.1	306	–	74
أميركا الوسطى والجنوبية/ الكاريبي	الأرجنتين	23.6	–	0.6	33
	الأكوادور	4.0	–	–	166
	المكسيك	76.5	–	1.3	54
	فنزويلا	95.0	–	0.8	183
	ترينيداد	–	–	–	55
	بوليفيا	–	–	–	19
	البرازيل	–	–	–	22
	شيلي	–	–	–	54
	التقدير للمنطقة	209.5	260	–	72
المجموع		1689.2	2196	–	59[ب]

(أ) تريليون قدم مكعب من الغاز تساوي 106 وحدة حرارية بريطانية (1 كواد) أو 100000 جيغاواط – ساعة (المعادل – الكهربائي). (ب) معدل نسبة الاحتياطي/ الإنتاج للعالم (R/P)

المصدر: International Energy Agency (1982, 1995), World Bank (1983), and Cambridge Energy Research Association (1988).

مصادر الطاقة المتجددة في العالم

الافتقار إلى الوقود الأحفوري لا يقرر وحده التجهيز الطبيعي لموارد الطاقة. هناك أيضاً موارد الطاقة المتجددة، وهو صنف متنوع يشمل القدرة المائية وطاقة الريح والطاقة الشمسية والكتلة الحيوية المحصودة وبخاصة الخشب.

الجدول 8-5: مقارنة لاحتياطيات أنواع الوقود الإحفوري التقليدية وغير التقليدية

	مصادر العالم المعروفة من الاحتياطيات القابلة للاستخراج (1995)			
	وحدات قياسية	كواد	توزيع الوحدات الحرارية BTU(٪)	
النفط	1001 مليار برميل	570	11.4	تقليدية
الغاز الطبيعي	4980 تريليون قدم مكعب	5134	10.3	تقليدية
الفحم	1039 مليار طن متري	23688	47.5	تقليدية
سوائل الغاز الطبيعي	786 تريليون قدم مكعب	3153	6.3	تقليدية
القيريات	26.6 مليار برميل	107.9	0.2	غير تقليدية*
زيت السجّيل (تقدير)	8612.0 مليار برميل	10352.0	20.8	غير تقليدية*
الرمال القيرية	300.0 مليار برميل معادل نفطي	1740.0	3.6	غير تقليدية*
المجموع		49878.0	100.00	

* احتياطيات المصادر غير التقليدية كما في عام 1981.

المصدر: مقتبسة من P.G. Le Bel (1982). *Energy Economics and Technology*. Johns Hopkins, Baltimore and USEIA, 1995.

وأساس مصدر الاهتمام بالطاقة المتجددة في العالم الصناعي الرغبة في التخلص من الوقود الأحفوري لأسباب اقتصادية وبيئية وحتى جمالية. أما في أكثر الدول النامية فتلعب الموارد المتجددة دوراً أساسياً. ويقدم الخشب خير مثال على ذلك فهو نوع مهم بدرجة فائقة في الكثير من الدول ويوفر متطلبات الطاقة الأساسية للعيش من طبخ وتدفئة منزلية. وهو النوع الأساسي من موارد الطاقة في كثير من المناطق الريفية في الدول النامية، إن لم يكن النوع الوحيد. ولم يتأثر الطلب على الخشب بسبب ندرة النفط التي أصابت العالم الصناعي، رغم أن توافره عرضة لتأثير عدد من القوى – مثل النمو السكاني والهجرة. وكما سنرى عند النظر في عدد من موارد الطاقة المتجددة في العالم، فربما تكون هناك فرص ومشاكل كبيرة في التوسع باستخدام الموارد المتجددة في الدول النامية.

القوة الكهرومائية

القوة الكهرومائية في الوقت الحالي أكبر وأحسن موارد الطاقة المتجددة تطويراً. وهي طريقة تقنية لتوليد الكهرباء (كما رأينا في الفصل الثالث) وتوفر خدمة اقتصادية في كافة أرجاء العالم. وقد نما استخدام الطاقة الكهرومائية في الدول المتطورة خلال أزمة الطاقة. أما في الدول النامية فقد أصبحت مشاريع الطاقة المائية ذات ميزة رمزية تقريباً. وينظر إليها كرمز للتقدم وكمثال للتطور التكنولوجي الحديث. فللسدود العظيمة وبحيراتها التي صنعها الإنسان فخامة خاصة رغم احتياجها إلى مقادير كبيرة من رأس المال الذي لا تستطيع الدول النامية توفيره غالباً.

تعتبر المصادر المائية أفضل أصناف المصادر المتجددة تحديداً وذلك بفضل ثروة المعلومات التي نمتلكها عن مساقط المياه الإقليمية في كافة أنحاء العالم. وتحدد الموارد في التعبير عنها بالقدرة الكهرومائية الكامنة (انظر الفصل الثالث) وتقاس الكيلوواط أو الميغاواط أو الغيغاواط (حيث إن $1\ GW_e = 1000\ MW_e$) من منتوج الطاقة الكهربائية. ويبين الجدول 5-9 الموارد المائية في العالم حسب القارات والجزء المستغل منها. ويبين الجدول أيضاً المجموع الجزئي للدول النامية والدول المتطورة.

كان يمكننا أن نرى بسهولة إن القدرة المائية الدولية الكامنة كبيرة جداً وتبلغ $2200\ GW_e$. في حين أن محطة حرارية عالية نموذجية سعة كبيرة تعطي منتوجاً يبلغ نحو $1000\ MW_e$ أو GW_e واحد، لذا فإن الطاقة المائية في العالم تعادل 2200 محطة حرارية ضخمة. وذلك يمثل ضعف سعة التوليد الموجودة في العالم لمحطات القدرة من كافة الأنواع والأحجام. وبسبب توزيع الموارد المائية جغرافياً لا يمكن استبدال كافة المحطات الحرارية التي تعتمد على الوقود الأحفوري بمحطات كهرومائية. فبعضها يمكن استبداله في حين لا يمكن استبدال البعض الآخر، لكن الأهم من ذلك هو أن جزءاً كبيراً من القدرة الكهرومائية المراد تجديدها تصبح عصية بسبب تقلب أسعار الوقود الأحفوري والتجهيزات.

وكان 25 في المئة تقريباً أو ما يوازي $577 GW_e$ من القدرة الكهرومائية في العالم قد جرى استغلاله مع نهاية الثمانينيات (الجدول 5-9). وهذا يشمل بعضاً من المشاريع الكبيرة المعروفة مثل إتايبا* (Itaipa) على الحدود البرازيلية – الباراغوية.

* ذكرت في الأصل بهذه الصورة والصحيح أنها إيتايبو(Itaipu).

لكنه يشمل أيضاً مشاريع مائية صغيرة، فهناك مثلاً 92000 محطة مائية صغيرة في الصين (مجموع سعتها $6.6\ GW_e$).

وتبلغ نسبة القدرة المائية الكامنة المستغلة في الدول النامية نحو 15 في المئة فقط. وهذا يمثل نحو 50 في المئة من سعة التوليد الكهربائية العاملة في الدول النامية، لكن من الواضح أن التوسع في التوليد الكهرومائي خيار متوفر للعالم النامي.

غير أن توزيع ما أسبغته الطبيعة من القدرة المائية في الوقت ذاته ليس منتظماً بأي حال من الأحوال، وبخاصة في ما يخص الحاجة. فآسيا بكاملها تمتلك نصف معدل جريان المياه للفرد الواحد. والامتداد المجدب الواسع عبر أفريقيا المعروف باسم الساحل* خالٍ تقريباً من أي مصادر للمياه. وسقوط الأمطار في عدد من المناطق عرضة لتغيرات واسعة، لذا فإن أي محطات كهرومائية تعتمد على جريان مياه المطر ستعاني التغيرات نفسها وستحتاج إلى دعم من معدات توليد حرارية لتجنب النقص في توليد الكهرباء في بعض الأوقات. وحتى إذا توفر سقوط الأمطار بشكل كبير، فلا يوجد ضمان على امتلاك بلد ما لموارد كهرومائية وافية. فالأمر يتطلب أراضي متموجة أو جبلية إضافة إلى الماء، وهذا المطلب يستثني الكثير من دول العالم[4].

وتنافس الطاقة الكهرومائية في معظم المواقع الممكنة محطات القدرة الحرارية من حيث الكلفة. فالمشاريع المائية الضخمة، لا تكلف في بنائها أكثر ما تكلفه المحطات الحرارية ذات القدرة المماثلة وكلفة إدامتها في الأغلب أقل، كما لا توجد أي كلفة للوقود (انظر الفصل 9). غير أن هناك كلفة رئيسة قد تخفض تنافسية كلفة القوة المائية وهي خطوط نقل القدرة الكهربائية إلى المسافات البعيدة. فالمواقع المائية غالباً ما تكون بعيدة عن المراكز السكانية، وبذلك تتطلب خطوط نقل قدرة بالفولتية العالية. وقد كان من المجدي في بعض الحالات نقل الكهرباء المولدة مائياً عبر مسافات بعيدة. ففي زائير (جمهورية الكونغو الديمقراطية) توجد موارد كهرومائية كبيرة (إمكانية تبلغ $40\ GW_e$) على نهر زائير لكنها على بعد 1700 كم من المناجم الغنية بالنحاس.

---

* ربما يقصد المؤلف بذلك منطقة الصحراء الكبرى الممتدة من الأطلسي حتى نهر النيل ثم عبر النيل إلى البحر الأحمر. أما منطقة الساحل فهي شريط جنوب منطقة الصحراء فيه قليل من المطر والكلأ ويمتد عبر السنغال وموريتانيا ومالي والنيجر وتشاد والسودان.

4 وكذلك تستعصي التضاريس الجبلية على مساعي التطور، فهذه المناطق قد تكون بعيدة وكثيرة الوعورة لكي تتناولها الوسائل الكهرومائية.

الجدول 5-9: قدرة التوليد الكهرومائية في العالم: الإمكانية القابلة للاستغلال تقنياً والسعة المستغلة – حالياً

المنطقة	البلد أو المنطقة الفرعية	الإمكانية القابلة للاستغلال تقنياً GW_e	سعة التوليد المستغلة GW_e	مستغل (%)
	جنوب آسيا		45	
	الصين		33	
	اليابان		20	
آسيا (المجموع)		610	98	16
	أميركا الجنوبية		85	
	أميركا الوسطى		11	
أميركا اللاتينية (المجموع)		432	96	22
أفريقيا (المجموع)		358	17	5
	كندا		58	
	الولايات المتحدة		90	
أميركا الشمالية (المجموع)		356	148	42
الاتحاد السوفياتي السابق (المجموع)		250	62	25
	أوروبا الشرقية		17	
	أوروبا الغربية		128	
أوروبا (المجموع)		163	145	89
أوقيانوسيا (المجموع)		45	12	27
	المجموع للعالم	2214	577	25

مقتبس من: Deudney Moreira and Poole (1993); Internat. Water Power and Dam Construction, (1981); Sept. 1989; Vital Signs, 1993.

وكان $2\ GW_e$ من القوة المائية على نهر زائير قد طور في عام 1980 وكان $0.5\ GW_e$ منه تقريباً ينقل إلى عمليات صهر النحاس في المناجم. وقد برهن دمج توليد ونقل الكهرباء على أنه أرخص جداً من نقل خام النحاس 1700 كيلومتر إلى موقع التوليد الكهرومائي*. لكن كلفة إنشاء خطوط نقل القدرة كانت في حالات أخرى باهظة

* الجدوى الاقتصادية لنقل الكهرباء بدل نقل خام النحاس لا تحتاج إلى دراسة مختصة ذلك لأن خام النحاس لا يحوي سوى 0.6 إلى 2 في المئة من فلز النحاس أي إن كل طن من خام النحاس إذا ما نقل مسافة 1700 كم سيعطي ما بين 6 إلى 20 كلغم من النحاس فقط.

جداً. جرى نتيجة ذلك، إمّا جلب المشروع الصناعي قرب مصدر القوة المائية (كما في حالة مصاهر الألمنيوم في منطقة الشمال الغربي على ساحل المحيط الهادي)، أو التغاضي عن القوة المائية نفسها واختيار طرق بديلة لتوليد الكهرباء.

ومع ذلك فهناك عديد من مواقع القوة المائية التي يمكن استغلالها في الدول النامية. ومع ازدياد الحاجة سيجري تطوير بعضها، رغم ضرورة قيام الدول المستفيدة بالبحث عن المصادر المالية لتنفيذ ذلك.

القدرة الجيوحرارية

الحرارة الداخلية لكرة الأرض وهي إحدى مصادر الطاقة متوفرة لعدد قليل من الدول. وهذا المصدر المسمى بالطاقة الجيوحرارية (Geolthermal Energy) يمكن أن يولد الكهرباء ويوفِّر الحرارة للاستخدامات الحرارية البحتة مثل التدفئة الداخلية والمعالجة الصناعية، عندما يكون بحالة بخار. وتتوزع مواقع القدرة الجيوحرارية في غرب الولايات المتحدة وإيطاليا وإيسلندا من بين الدول المتطورة، وفي المكسيك والفيليبين وإندونيسيا من بين الدول النامية. ويبلغ الاستخدام الحالي للطاقة الجيوحرارية في العالم نحو $4\ GW_e$ في محطات توليد الكهرباء ونحو 12 GW للاستخدامات الحرارية. وتحدد تكنولوجيا الاستكشاف والاستخدام الحالية إمكانية أي تطوير إضافي (انظر الملحق ج). والطاقة الجيوحرارية على أي حال مورد محدود على مستوى العالم.

قدرة الرياح والقدرة الشمسية

سيجري عرض أسس تحويل الطاقة الشمسية وطاقة الريح في الفصل الحادي عشر (وفي الملحق ج). غير أن عدداً من النقاط يجب أن تذكر هنا. فرغم إن التقنية موجودة لتحويل الريح أو نور الشمس إلى كهرباء أو تحويل نور الشمس إلى طاقة حرارية مفيدة، إلا أن طاقتي الريح والشمس ليستا مستخدمتين بصورة واسعة حالياً. في ضوء وضع تكنولوجيات الريح والشمس حالياً، نجد **أولاً** أن الرياح لا تهب بقوة كافية، أو لمدة كافية، كما إن الشمس لا تشرق بصورة شديدة أو منتظمة ليجعل كل منهما مصدراً معتمداً للطاقة في الكثير من الدول.

الشيء **الثاني**، هو أن هذين المصدرين، حتى إذا كانا متوافرين وبقوة كافية إلا أنهما

بطبيعة متقطعة دائماً، أي إنهما يختلفان عبر الوقت وهما غير متوفرين كلياً في أوقات معينة من النهار أو بسبب أحوال مناخية معينة. والتجهيز المتقطع للطاقة غير مقبول لبعض الاستخدامات مثل القدرة الكهربائية[5]. لذا فإن هذه التكنولوجيات يجب أن تستخدم مع مصادر الطاقة التوليدية لتوكيد استمرارية التجهيز. ومع ذلك فبالإمكان في الواقع تحمل تجهيز متقطع لاستخدامات أخرى ضمن تكنولوجيا عاملة.

كانت طواحين الهواء مثلاً مستخدمة منذ الأزمنة القديمة لتدوير مضخات الري ولاستصلاح الأرض (وبخاصة في هولندا). واستمرارية توافر طاقة الريح لهذه الأعمال ليس بأهمية التوفير المستمر طوال الوقت، بل يجب أن يكون كافياً لضخ كمية الماء المطلوبة عبر فترة زمنية محددة. وقد برهنت مضخات الماء الحديثة العاملة بالكهرباء التي تولدها الريح والشمس على فائدتها في العالم الثالث وبخاصة في المناطق الزراعية البعيدة عن خطوط تجهيز القدرة. وقوة الريح والقوة الشمسية مفيدتان أيضاً للصناعات مثل تكرير النفط أو تحلية الماء حيث يمكن تحمل تجهيز متقطع طالما كان الإنتاج السنوي كافياً وحيث يكون المنتوج نفسه (تكرير النفط أو الماء المزال ملوحته) قابلاً للخزن إذا ما كان التدفق المستمر للمنتوج مطلوباً*.

وهناك حاجة إلى تطوير تكنولوجي للاستخدامات التي لا يمكن فيها تحمل تجهيز متقطع للطاقة بحيث يمكن تخزين الطاقة بطريقة كفوءة وبكلفة معقولة (انظر الفصل الحادي عشر والملحق ج). وعملية الخزن الآن مكلفة جداً، لذا فإن تكنولوجيات الريح والشمس محدودة الاستخدام وخصوصاً في الدول الفقيرة. وسيضع البلد فقير الموارد نفسه في موقع غير مواتٍ من خلال تبني الطاقة الشمسية أو طاقة الريح والقيام بدفع كلفة المعدات الإضافية المطلوبة لخزن كمية كافية من الطاقة[6] أو لتوفير موارد طاقة داعمة تعمل بالوقود الأحفوري. وسيزيد الاعتماد الواسع على طاقة الريح

5 إننا نخص بالطبع التوليد المستمر للقدرة الكهربائية. وكما سنرى في فصول قادمة فإن الطاقة الشمسية قد توفِّر بديلاً للتوليد من الوقود الأحفوري خلال فترات الذروة ـ ويدعى ذلك حمل الذروة ـ وبخاصة عندما تقع تلك الفترة خلال الوقت الذي تكون الشمس ساطعة بأشد صورها.

* قد تكون تحلية الماء أمراً تسهل فيه هذه الطريقة في المعالجة إلا أن من الصعب تصور عملية تكرير النفط تعمل بطاقة كهربائية غير ثابتة. فهذه الصناعة من النوع المستمر ويجب أن تكون درجات الحرارة والضغوط وتدفق المواد تحت سيطرة وثبات لا يمكن معه تحمل تذبذب كمية الطاقة المجهزة إلى معدات وحدات التكرير.

6 يجب عند احتساب كلفة المعدات الرأسمالية إدراج كلفة التحويل ـ أي الفائدة التي تدفع على النقود المقترضة. (انظر الفصل 9 حول كلف التحويل).

والطاقة الشمسية من كلفة الإنتاج الصناعي ويأخذ جزءاً أكبر مما يجنيه البلد من النقد الأجنبي مقارنة بالأنظمة التقليدية. وسيبطئ الاعتماد الكبير على هذين النوعين من الطاقة باستخدام التكنولوجيا الحالية، تطور الدول الفقيرة اقتصادياً.

وقد دافع البيئيون الراغبون في الحد من التوسع باستخدام الوقود الأحفوري عن إدخال تكنولوجيا الريح والشمس بطريقة واسعة في مواقع متفرقة في الدول النامية. ويشير هؤلاء المدافعون إلى أنها مصادر طاقة جذابة – سليمة بيئياً ومتجددة بصورة تامة – وأن أي بلد يتبناهما سيتجنب تلويث البيئة. وإذا كان على الدول النامية دفع كلفة مصادر الطاقة هذه فإنها ستبقى فقيرة في المستقبل القريب. والتقنية التقليدية أرخص وتساعد على تطوير الدولة النامية. ورغم أهمية البيئة إلا أن إقناع دولة نامية بالاهتمام بتلوث الهواء عندما لا ينال شعبها كفايته من الغذاء، قد يكون صعباً.

تعتمد إمكانية استخدام هذين المصدرين للطاقة المتجددة على الجغرافيا وعلى ما تكلفه مصادر الطاقة التقليدية وعلى التكنولوجيا المستقبلية. فالمعدات الشمسية ستعتمد دوماً على مقادير كبيرة من نور الشمس، وماكينات الريح على رياح قوية ومنتظمة وهذه المتطلبات من الطبيعة تحد من فائدة هذه التكنولوجيات. غير أن كل تكنولوجيا تتقدم ستعمل بكفاءة أكبر تقنياً، وتكون كلفتها أقل، ما ستزيد من قابلية استخدامها اقتصادياً كمصدر للطاقة في المناطق التي تكون مجدية فيها، وخصوصاً إذا ارتفعت كلفة الوقود الأحفوري. وكما سنرى في فصول تالية هناك بعض المجال لتبدل حقيقي بعد عقد أو عقدين مستقبلاً من حيث الكلفة النسبية والتقدم التكنولوجي. وهذا الأفق الزمني رغم قصر مدته ظاهرياً كما يبدو هو فترة مهمة للدول النامية، وهي فترة إما قد تنمو فيها الأمم أو تسقط بيأس كبير في هاوية الفقر.

طاقة الغابات والكتلة الحيوية

يدعى الصنف الرئيس الأخير من المصادر المتجددة في العالم (الكتلة الحيوية (Biomass)). ومصادر الكتلة الحيوية أولاً هي أنواع النبات المختلفة أكانت مزروعة (مثل قصب السكر) أم غير كذلك (مثل معظم أنواع الخشب). الخشب هو أكبر المصادر إلى حد بعيد. فالمساحة الكلية للغابات في العالم تبلغ 4×10^9 هكتارات (والهكتار الواحد = 4×10 متر مربع) من مساحة كلية لليابسة تبلغ 15×10^9 هكتار.

ويبين الشكل 5-2 توزيع أراضي الغابات هذه. كما يبين الشكل أيضاً إمكانية إنتاج الخشب استناداً إلى سرعة ثبات الكربون السنوية (عملية التركيب الضوئي) الممكنة في منطقة معينة. وتحدد إمكانية إنتاج منطقة ما كمية الخشب الممكن حصده منها سنوياً لاستخدامه كوقود (انظر: Earl, 1974, and Jhirad, 1987). ومن غير المدهش رؤية أكثر مناطق الغابات إنتاجية في المناطق الاستوائية والعالم النامي.

تنتج غابات العالم زيادة سنوية (أي نمو) تقدر بنحو 13×10^9 طن من الخشب، تمتلك قيمة وقود حراري تعادل 8×10^9 طن من الفحم. ومع ذلك لا يحصد سوى ثمن هذا المقدار من النمو السنوي الآن. ويستهلك نحو نصف الحصاد السنوي من الخشب كوقود، أما الباقي فيستخدم كخشب منشور أو للإنتاج الصناعي مثل صناعة الراتنج. ويوفر الخشب بصورة عامة نحو 7 في المئة من الإنتاج الكلي للطاقة عالمياً، لكن ثلاثة أرباعه يُستهلك في الدول النامية. ورغم أن العالم يحصد كمية من الخشب تقل عما ينمو سنوياً، إلا أن الدول النامية التي تعتمد على الخشب كوقود تقوم في عدة حالات في الحقيقة باستنزاف موارد الغابات لديها.

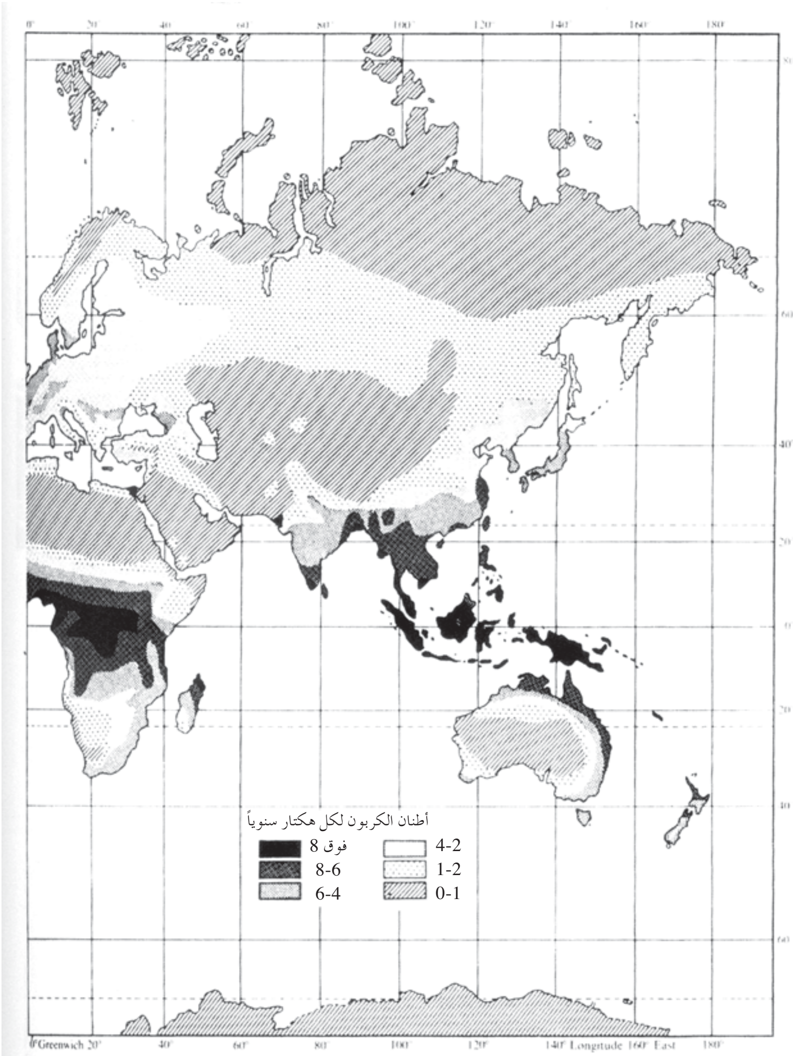
والخشب هو الوقود الأولي لكثير من أفقر دول العالم. فتسعون في المئة من سكان أفريقيا جنوب الصحراء مثلاً يعتمدون على الخشب كمصدر للوقود. وقد يحرق الخشب مباشرة أو قد يحول إلى نوع مشتق من الوقود مثل فحم الخشب (انظر الفصل الحادي عشر). وغالباً ما يستخدم فحم الخشب في التطبيقات الصناعية،ولكنه غير ملائم لمتطلبات التصنيع في الدول النامية. (فالأفران التي تحرق فحم الخشب مثل تلك المصورة في الشكل 5-3 لها كفاءة واطئة). إن إمكانية إنتاج الطاقة بمقياس الزيادة في نمو الغابة سنوياً غير كاف في كثير من الحالات لتلبية الحاجات المتزايدة للوقود في هذه الدول، فالحصاد يتجاوز النمو السنوي الآن. وقد جردت مناطق تمتد لأميال حول المراكز السكانية من غاباتها. (الشكل 5-4) وهناك عموماً 11 مليون هكتار من الأراضي تتصحر غاباتها سنوياً، ورغم أن قطع الأشجار لأغراض تصنيعية ورعي الحيوانات الجائر يساهمان في هذا، إلا أن معظم التصحر يعود إلى جمع الوقود. وقد جرت محاولات لإعادة تشجير ملايين الهكتارات سنوياً غير أن التقديرات لا تزال تبين فقداناً صافياً. وتبعاً لبعض الإسقاطات (Repetto, 1985) فإن معظم الغابات المطرية ستزال مع انتهاء القرن إذا استمرت هذه التوجهات.



الشكل 5-2: التوزيع الجغرافي لإمكانيات غابات العالم لإنتاج الوقود أطنان من الكربون لكل هكتار سنوياً.

المصدر: Earl (1975)

وقد تركزت آمال الاستمرار وحتى التوسع باستخدام كتلة الخشب الحية على تغيير السياسات والتكنولوجيا. وقُدم اقتراح بإعطاء الناس في الدول الفقيرة (أو أن تباع لهم بأسعار رخيصة) مواقد للطبخ تستخدم الخشب بكفاءة (انظر: Goldemberg [et al.], 1987). ويمكن أن يقلل استخدام هذه المواقد التي ستعتمد التكنولوجيا



الحالية، من التصحر وبخاصة إذا ما بُذل جُهد في تدبير تجهيزات الوقود. وربما يقلل انتشار الكهرباء في أرياف الدول النامية من التصحر. غير أن بناء وتوفير المواقد سيتطلب على أي حال استثماراً يقدر بنحو مليار دولار سنوياً (انظر: Goldemberg [et al.], 1987). وتوزيع هذه المواقد والتوزيع المستمر للخشب مكلف، ويمكن أن يُنشئ مشاكل لوجستيه. والحقيقة أن افتقار البنية التحتية والنزاعات السياسية الداخلية في بعض الدول تجعل عملية التوزيع متفاوتة إن لم تكن مستحيلة.

هناك أمل بتوسيع استخدام موارد الغابات من خلال اللجوء إلى إدارة الغابات أو إلى مشاتل الغابات (Earl, 1975, and Anderson and Fishwick, 1985). وتقوم مثل هذه العمليات التي يمكن أن تدعى مزارع محاصيل الطاقة بموازنة المحصود مع المُعاد زراعته، ومع خصوبة الأرض للحصول على إنتاج مستدام. إلا أن تأثير هذه الجهود في مشكلة التصحر كانت في حقبتنا هذه محدودة، رغم الاستمرار ببذلها لجعل الغابات وإنتاج محاصيل الطاقة قابلين للتجديد بصورة حقيقية.

ويبدو أخيراً أن كماً أكبر من السياسات العامة والتخطيط ستكون مطلوبة للتعامل مع إدارة طاقة الكتلة الحيوية بدفع مسائل ذات علاقة بالضغوط السكانية واستخدام الأرض وتطوير بدائل الوقود. ومن دون تخطيط كهذا ومن دون الاستثمار المالي المطلوب لتحقيقه ربما يتعرض النمو الاقتصادي إلى عوائق شديدة في العديد من الدول النامية. وربما تتعرض التنمية في مناطق أخرى من قطاع الطاقة إلى عوائق أيضاً.

إن السدود الكهرومائية مثلاً تتأثر بتراكم الغرين حيث تجرف الأمطار التربة في المناطق المقفرة التي تصحرت. وستتراجع الزراعة بطريقة مشابهة بتآكل التربة. وبعبارة أخرى التصحر لا يهدد فقط تجهيزات الطاقة وحسب، بل الحياة بأسرها في العديد من الدول النامية. فبلد مثل مالي على شفير الانهيار الاقتصادي وكل يوم يكنس سكانه رمال الصحراء الزاحفة عن عتبات بيوتهم الآن. وتلوح إمكانية حدوث كارثة بسبب التصحر في دول أخرى بصورة واضحة.



الشكل 5-3:
أفران خشبية لإنتاج فحم الخشب في أوغندا
المصدر: Earl (1975).



الشكل 5-4:
منطقة تصحر في نيبال سببها جمع مفرط للوقود ورعي الماشية
المصدر: .Earl (1975)

الطاقة النووية في العالم

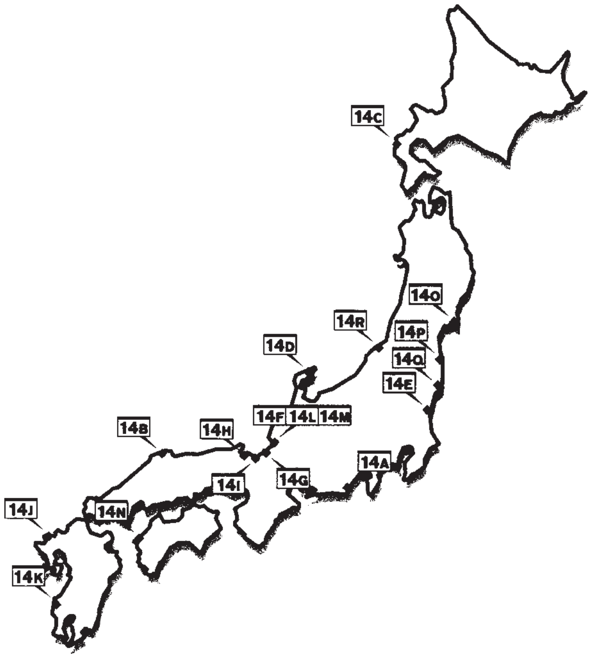
لقد ادخلت الطاقة النووية (انظر الفصل السابع) في بعض الدول النامية كذلك. ولا يعتمد وضعها الحالي والمستقبلي على مصادر الوقود، بل على حالة التكنولوجيات النووية ذاتها – التي تُقرر في الدول الصناعية. ولا يهدد إنتاج الوقود من اليورانيوم حالياً استنزاف الاحتياطيات المتوافرة، كما إن التكنولوجيات النووية الأحدث مثل مفاعلات توليد القدرة (الفصل الثامن)، أو الاندماج (الفصل الحادي عشر) ليست قيد الاستخدام التجاري حتى في العالم الصناعي. ولا يزال تأثيرها الجوهري في الموارد وتطوير الطاقة على مستوى العالم غير مؤكد.

وهناك في العالم اليوم ما يزيد على 300 محطة طاقة نووية قيد التشغيل (الشكل 5-5). وفي حين توقّف بناء المحطات النووية فعلياً في الولايات المتحدة، إلا أنه مستمر في بضعة دول آسيوية مثل الصين وكوريا الجنوبية واليابان. ومن ناحية ثانية أوهن القلق على سلامة وكلفة هذه المحطات جهود التطوير حتى في الدول التي لديها برامج مستمرة لتشييد منشآت نووية (انظر الفصل 7 إلى 9).

وهناك نقطة مركزية عند النظر في فرصة تطوير الطاقة النووية خارج الدول الصناعية: فتكنولوجيا الطاقة النووية الحالية معقدة جداً وخارج إمكانية التطوير من


23F
23C
23H
23B
23I
23E
23G
23A
17A
LITHUANIA
31A
31C
31B
31D
31E
SEE INSET
FOR MAP OF EUROPE
UKRAINE
KAZAKHSTAN
15A
SEE INSET
FOR MAP OF JAPAN
16D
16A
16B
16C
CHINA
6A
SOUTH
KOREA
20B
PAKISTAN
13D
20A
13B
13E
INDIA
13A
30A
30B
30C
6B
TAIWAN
21A
PHILLIPPINES
13F
13C


SWEDEN
28B
28A
28D
32K
32L
32A
32B
32H
32I
32J
NETHERLANDS
BELGIUM
U. K.
32E
32G
32C
19B
19A
11H
10H
32F
10N
10K
32D
2A
10T
10R
2B
10G
10D
10Q
10C
10U
10P
10F
10O
11E
11M
11D
11L
11G
11B
11N
11P
GERMANY
11O
11I
11A
11J
11F
11C
11K
CZECH
8B
8A
SLOVAKIA
24B
24A
HUNGARY
12A
SLOVENIA
25A
29A
29C
29B
29D
SWITZERLAND
FRANCE
10J
10E
10B
10M
10I
10L
10A
10S
27I
27F
27D
27C
27A
27B
27E
27H
27G
SPAIN





الشكل 5-5* توزيع محطات القدرة النووية في العالم

المصدر: American Nuclear Society, 1995, all rights reserved. Printed with permission.

---

* لا تبين هذه الخريطة كل المحطات في العالم فالمحطات في فنلندا وبلغاريا ورومانيا وكندا وأفريقيا الجنوبية والأرجنتين والبرازيل والمكسيك غير مدرجة كلياً، كما إن جزءاً من محطات روسيا غير مدرجة كذلك.

قبل معظم الدول لتطوير قدراتها وحتى الدول النامية التي تمتلك موارد من اليورانيوم أكثر من بيع ثروتها الطبيعية إلى العالم الصناعي. وتحتكر القوى الصناعية التكنولوجيا النووية اليوم. ولما كان هناك بعض التوافق على الأقل بين تكنولوجيا الطاقة النووية وتكنولوجيا الأسلحة النووية، فالقوى العظمى ليست راغبة في نقل إمكانياتها النووية من دون ضوابط. وسيكون المدى الذي يمكن للدول النامية عنده الحصول على الطاقة النووية ضمن شروط تقييدية مصممة لمنع انتشار الأسلحة النووية. في الوقت ذاته وفي ضوء الكلفة العالية جداً لمحطات الطاقة النووية، فإن الحاجة إلى أشخاص مدربين لإدارة المشاريع والمصاعب المرتبطة بالسلامة النووية والتخلص من النفايات، تبدو الطاقة النووية خياراً معقولاً فقط لدول نامية (مثل كوريا) لديها موارد تقليدية طبيعية محدودة وأحرزت تقدماً كبيراً نحو التصنيع.

الموارد والتطوير: قضية الشمال والجنوب

امتلاك بعض موارد الطاقة مثل اليورانيوم أو الغاز الطبيعي لا يؤكد بصورة واضحة تجهيزات الطاقة أو التطوير الاقتصادي. والقضية على أي حال موضع نقاش في العديد من الدول، فليس لديها موارد وهي قادرة على استغلالها. وفي أي من الحالتين يضع توزيعها الموارد في موقع خسارة. ولما كانت عملية التطوير في الدول الفقيرة تعتمد بصورة حرجة على توفر الطاقة، فعليها على أي حال إدامة تجهيز موارد الطاقة التي لا تستنزف كل مواردها المالية.

من الواضح أن بعض الدول ليست قادرة على الإيفاء بحاجات مواردها وتنمو اقتصادياً ـ أو أنها على الأقل غير قادرة على فعل ذلك من دون مساعدة الدول الغنية. فالأغنياء قدموا المساعدة لكن بعض صناع السياسة والفلاسفة تساءلوا إلى أي مدى يجب أن تصل المساعدة وفيما إذا كان من الواجب الاستمرار بها. ورغم أن الخبراء يوصون بالمساعدات إذا ما كانت تفي بالتزام أخلاقي أو تحقق ضرورة عملية، ولا يوجد أي اتفاق عالمي يقول إن تحويلات الثروة تحقق أياً من الغرضين.

ومن وجهة النظر الأخلاقية، الشعور بالإحسان إن لم يكن لأي سبب آخر أن توفر الدول الغنية في العالم مساعدات سخية للفقراء. فالأخلاقيات التقليدية تستوجب مساعدة المحتاج والأمم الفقيرة على وجه التأكيد في حاجة ماسّة. لكن تقبل العلاج

التقليدي – تحويل الموارد والتكنولوجيا من الغني إلى الفقير (أو من الشمال إلى الجنوب عاكساً التوزيع الجغرافي للغنى والفقر) – ليس عالمياً. وهناك في الحقيقة منظوران تحديديان يدعوان إلى سياسات متعارضة تماماً تخص تحويل الموارد والثروة. فمعارضو المساعدات ليسوا ببساطة وكما يجب توكيده قساة قلوب، إنما يفكرون بأنهم وراء خير أعم وهو بقاء الحضارة الإنسانية إن لم نقل كوكب الأرض بذاته انظر: (Hardin, 1986, in: Aiken and LaFollette, 1977; Ehrlich and Ehrlich, 1970; Ophuls, 1977,) ومداولات من قبل

.(Shrader – Frechette, 1981, and Cawley in: Welch and Meiwald, 1983)

إن معارضة نقل الثروة يستند إلى مفهوم أخلاقي خاص يدعى بأخلاقيات قارب النجاة. وتبعاً لهذا المنظور فكل أمة تشبه قارب نجاة مرمي في بحر عدائي مهدد بالتلوث واستنزاف الموارد والانفجار السكاني. والقوارب الغنية أي الدول الصناعية لديها حمولة معقولة نسبة إلى قابلية تحملها. أما القوارب الفقيرة فهي مكتظة وسيئة التجهيز وفي خطر محدق مخافة أن تغرق. وبإمكان القوارب الغنية أن تأخذ بعض الناس (المهاجرين) وأن تحول المؤن (تجهيز موارد).

وستكون المشاركة، بحسب رأي أخلاقيات قارب النجاة، الشر الأكبر فعلاً، لأن لدى الدول الفقيرة مشاكل بذلك العمق وتلك الشدة، بحيث إن المشاركة في الموارد ستؤدي إلى شقاء أكبر لها على المدى البعيد. وستمنعهم المساعدة من التعامل مع المسائل المهمة مثل مشكلة السكان، كما ستمنعهم من تعلم الدروس القاسية المكتسبة بالخبرة، وسيمنعهم ذلك بدوره من تطوير السياسات المطلوبة للبقاء معتمدين على قابلية حمل قارب نجاتهم. وستكون المشاركة في الحقيقة سيئة للجميع لأنها ستؤدي إلى استنزاف أسرع للموارد على مستوى العالم. فما ستعطيه الدول الصناعية بشكل مساعدة لا تستطيع في الأغلب التعويض عنه، وهذا ما سيؤدي إلى معاناة أعظم في كل مكان – عند الأجيال المستقبلية إن لم يكن الآن – حين تتضاءل الموارد. وحسبما يعبر عن ذلك غارت هاردن (Garett Hardin) «إن العدالة الكاملة (لكل أفراد العالم ستؤدي) إلى كارثة كاملة».

وتكمن المشكلة حسب منظور هاردن في الطبيعة البشرية وهو ما يؤدي إلى ما يدعوه «مأساة العموم». فنحن نعتقد نظرياً أن موارد العالم أمر يشترك الجميع في

ملكيته والكل له حق فيه. لكننا كأفراد نسعى إلى تعظيم رفاهنا ونستخدم الموارد لتلك الغاية. وتصبح الموارد خلال هذه العملية – الهواء والماء كما هي حال الموارد غير المتجددة – مستخدمة أكثر مما يجب أو مستنفدة أو تالفة على أي حال. والمأساة هي أننا في سعينا إلى ما هو في صالحنا نوصل العالم بصورة جماعيةٍ إلى حافة الدمار. والناس في الدول النامية ليسوا مختلفين عن الناس في الأمم الصناعية في هذا الخصوص. فما إن يحصلوا على منفذ ميسّر إلى الموارد والتكنولوجيا يزداد السكان ويزداد التلوث وتستهلك كميات أكبر من الموارد، وبذلك ستسرع الكارثة الكونية التي يراها دعاة قارب النجاة قادمة نحونا (هناك كما يجب أن نلاحظ أكثر من أمثلة معدودة عن الهدر والفساد وسوء إدارة في برامج مساعدة الدول النامية، ما يعني أن تحويل الثروة غالباً ما يفشل في أداء مهمته على أي حال).

ربما يبدو هذا قاسياً بالنسبة إلى الدول الأقل نمواً غير أن افتراض وجود كارثة تلوح في الأفق تهدد الإنسانية قد يجعل الحلول المتطرفة ضرورية. ولا يترك دعاة قارب النجاة الدول الصناعية بسهولة كذلك. فسيكون المجتمع مع تبنيه أسلوب قارب النجاة قد تعهد بتقليص استخدام الوقود الأحفوري وتحديد عدد السكان وتحديد أو إلغاء النمو الاقتصادي وأي توسع في التصنيع في الحقيقة. ويجب أن تطبق هذه السياسات بالقوة ـ قسرياً إذا ما كان ذلك ضرورياً، أو كما عبّر عنها هاردن (1986) «إكراه متبادل جرت الموافقة عليه تبادلياً».

وليس من المستغرب أن شرعية حجج قارب النجاة قد جرى تحديها على عدة أسس. فهناك من بعض أنواع المنظور الأخلاقي معايير مطلقة وإذا ما كانت مساعدة الفقير صحيحة أخلاقياً فالواجب يقتضي مساعدته حتى إذا ما أدى ذلك إلى نهاية العالم (Watson, in: Aiken and LaFollette, 1977)، ومع ذلك فهذه الوصفة السياسية تبدو حتى بين أولئك الذين يتخيلون الكارثة ولا يمكن الدفاع عنها أخلاقياً. وتدافع إحدى وجهات النظر خصوصاً مقاربة عن سياسة معاكسة.

ويدعى هذا المنظور بأخلاقيات مركبة الفضاء[7]، ويرى أن أي فرد على الكوكب

---

7 يعزى الاستخدام المجازي لتعبير (مركبة فضاء كوكب الأرض) إلى أدلاي ستيفنسون (Adlai Stevenson) الذي كان سفير الولايات المتحدة في الأمم المتحدة واستخدم هذا التعبير في كلمة له سنة 1968 (حسب ملاحظة Shrader-Frechette, 1981).

هو مسافر على مركبة فضاء الأرض الذي لا يقتصر الأمر على دعمه، بل يجب ذلك (Fuller, 1969) وليس بإمكان السفينة إكمال رحلتها بينما يركب بعض مسافريها في الدرجة الأولى ويعاني آخرون. وفي هذا منطق عملي وأخلاقي. فالمسافرون الذين يعانون سيثورون ويلقون المركبة في اضطراب. ويرى دعاة أخلاقيات مركبة الفضاء أيضاً أن تحويل الثروة ليس إلا قضية عدالة لأن التصنيع في الشمال اعتمد إلى حد ما على استغلال موارد الجنوب. وما زالت الأمم الصناعية حتى اليوم تعتمد على البلدان النامية في مواردها الطبيعية والأسواق لسلعها ولمصادر عمالة رخيصة للصناعة. لذا، فإن إعادة تحويل الثروة إلى الأمم الفقيرة سيقر حسب هذا المنظور الاعتماد التبادلي في ما بيننا ويعوض عن الحيف التاريخي الذي أصاب الأمم الفقيرة (انظر: فوللر(Fuller) ، 1969 ونقاش في: Shrader- Frechette, 1981).

والحجتان اللتان تكمنان وراء أخلاقيات مركبة الفضاء – السلم العالمي والعدالة التاريخية ـ يوفران على أي حال قضية أفضل ضد موقع قارب النجاة مما يوفِّران لمقاربة مركبة الفضاء. فالمفهوم كما يظهر على الأقل في عدد من نسخة المهمة (انظر: Fuller, 1969) يبدو طوبائياً بصورة غير ممكنة ويبدو في أحسن صورة غير عملي، ويمكن أن يكون خطيراً. فلكي توازن الثروة يتطلب الأمر تبديلاً كاملاً لأسلوب الحياة في الشمال. وقد حاول فولر أن يقنعنا بوضع حظر على استخدام الوقود الأحفوري وإلغاء ملكية السيارات (وستبقى متوفرة للإيجار فقط) ووضع نهاية فاعلة للنمو الاقتصادي (متوافقاً في ذلك مع منظري قارب النجاة). ومثل هذه التغييرات يكون من الصعب جداً تنفيذها ويمكن أن ينجم عنها هيجان اجتماعي.

هناك مع ذلك تضارب في أسلوب مقاربة الفضاء على ما يبدو. فالمنظرون يدعون أن التغيرات سيجري تنفيذها ديمقراطياً، لا بل يجب أن يجري ذلك وبطيبة خاطر من قبل الدول الصناعية. ولا يبدو هذا معقولاً. ورغم ذلك فمن دون رغبة الناس يصعب تصور كيف يمكن لمثل هذه التطورات الاجتماعية الهائلة أن تحدث من غير سلطوية مقارنة بما تطلّبه نموذج أخلاقيات قارب النجاة، أو أكثر من ذلك. وإذا ما كانت أخلاقيات قارب الحياة في الحقيقة صحيحة في ما يخص طبيعة الإنسان فسيكون المقدر لأخلاقيات مركبة الفضاء الفشل من دون سلطوية سياسية (Author Itarianism). فليس من المتوقع أن يوافق الناس على تغيير عاداتهم وأسلوب حياتهم وسيرتطم إجبارهم

على الاعتداء على حرية الإنسان. ويبدو أن الخبرة تعطي بعض الدعم إلى منظور قارب النجاة من حيث إن الناس يحاولون الحصول على أكبر قدر من الراحة والرفاهية – حتى تظهر أزمة تهدد المجتمع على الأقل. ونتقبل نتيجة لذلك إما نظرية مركبة الفضاء أو نظرية قارب النجاة، وعلى المرء أن يقرر أن مصلحة العالم تتطلب تقييداً لحرية الإنسان وحدوداً لما نعتبره الحقوق الديمقراطية. وطالما بقي المجتمع ديمقراطياً ومؤمناً بحرية الاختيار حول معظم القضايا الشخصية فلن تكتب الغلبة لأي من النظامين ما لم يصب العالم بكارثة كبرى.

ومع ذلك فإن حرمان الأمم الفقيرة يمس ضمير الدول الغنية، وتتطلب أخلاقياتنا الاستجابة لفقرهم المستمر. ويجب إيلاء الناحية العملية من نظرية مركبة الفضاء ما يستحق الانتباه، فالمعاناة الكبيرة ستهدد استقرار العالم السياسي والاجتماعي مع مرور الزمن. فالناس ممن يعانون الفقر المدقع، والذين يستمر وضعهم بالتدهور يصبحون – وذلك مفهوم – يائسين ويعتنقون الإرهاب والثورات العنيفة أو أي وسيلة أخرى لتغيير حالهم. ولتجنب ذلك لا يرى الناس في الشمال من خيار غير الاستمرار بتحويل الموارد والتكنولوجيا – إلى الجنوب. ويتفق صناع السياسة في الوقت ذاته على وجود مسائل مهمة يجب النظر فيها حين تقدم المساعدة إلى الدول النامية. فكيف يمكن مثلاً أن تنقل الثروة والتكنولوجيا بأكثر الطرق تأثيراً؟ وماذا يجب على الشمال أن يطلبه من الجنوب ليضمن أن المساعدات استخدمت لتحسين الاقتصاد؟ وهل يجب وضع أي شروط على السياسات الداخلية؟ اقترح البعض مثلاً أن المساعدة يجب أن تكون مشروطة بتبني الدول النامية سياسات اقتصادية أكثر توجهاً نحو السوق وذلك لضمان النمو (Pachauri, 1985).

ويثير نقل مصادر وتكنولوجيا الطاقة مجموعة من الأسئلة. فإذا ما نقل الشمال تكنولوجيات الطاقة التقليدية فمن المحتمل أنه سيزيد التلوث وربما يؤدي إلى اعتماد متزايد للدول النامية على موارد شحيحة. وسيكون البديل نقل أكثر التكنولوجيات كفاءة أو التكنولوجيات الحديثة إما مجاناً أو بكلفة زهيدة جداً. وقد يشمل هذا محارق كفوءة للكتلة الحيوية أو أنظمة لطاقة الشمس والرياح بما فيها مصادر دعم. وليست التكنولوجيات المتعلقة بالرياح أو الشمس مجدية من حيث الكلفة إذا جرى شراؤها بأسعار السوق، لكنها قد تكون مجدية إذا ما دعمت سعرياً. ومع ذلك فإن

مثل هذا النقل للتكنولوجيا حتى إذا كان بصيغة منحة كلية لن يكون لها إلا استخدامات محدودة. فعلى التكنولوجيا أولاً كما أشرنا أن تلائم موقعاً محدداً. فمولد الطاقة من الرياح مثلاً لا يخدم غرضاً مفيداً حيث تكون الرياح خفيفة وغير منتظمة. والأهم من ذلك وفي بعض الدول لا يمكن استخدام التكنولوجيات المتقدمة بكفاءة لأن لا البنى التحتية ولا المؤسسات الموجودة المطلوبة لخدمتها ودعمها موجودتان. وقد كانت صيانة أنظمة تجميع الطاقة الشمسية مشكلة خاصة في غرب أفريقيا لهذا السبب (Cassedy and Meier, 1988)، ومع ذلك فإن الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وغيرها من التكنولوجيات المتقدمة إذا ما جرى دعمها وإدامتها بواسطة الدول الصناعية يمكن أن تساهم في تزويد الطاقة الحرارية والكهربائية لعدد من الدول النامية. وستكون مثل هذه البرامج العالمية أمثلة للتنمية المستديمة في العالم الثالث كما ارتآها تقرير بيرنهاردت.

ويمكن للأمم الصناعية أيضاً الاستفادة من عملية النقل. فتوسيع استخدام الموارد المتجددة سيقلل الاعتماد في الدول النامية على الوقود الأحفوري النادر وسيساهم في حماية البيئة في العالم. وسيتطلب مثل هذا البرنامج من الدول الصناعية توسيع وتحسين إمكانياتها في تصنيع التكنولوجيات التي تستخدم الموارد المتجددة. ويمكن لهذا في الحقيقة أن يقلل من كلفة الإنتاج إلى درجة تجعل التكنولوجيات البديلة ذات تنافسية سعرية أفضل مع تكنولوجيات الطاقة التقليدية.

وتحتاج الدول حتى مع مصادر الطاقة المتجددة إلى بعض موارد الطاقة الأحفورية للمستقبل المنظور ويجب أن يُضمن للدول الأفقر استمرار التجهيز والسعر. وقد بذلت محاولات أيضاً للبرهان على أن الشمال لا يمكنه وحده تحمل العبء لأن الشمال لا يتحكم بالوقود الأحفوري في العالم. ويجب على الدول الغنية في الجنوب، وبخاصة دول أوبك أن تتخذ بعض الإجراءات لمنع الدول الأقل نمواً من مواجهة صدمات الأسعار والتجهيزات التي يمكن أن تعرقل عملية التطوير الاقتصادي (Pachauri: 1985).

وقد كان هناك بالطبع نقل مستمر للموارد من الأغنياء إلى الفقراء لسنوات عديدة. ففي عام 1986 وفرت الدول الغنية 37 مليار دولار بهيئة مساعدات إلى الدول الأفقر،

كما أضافت أقطار أوبك الغنية أكثر من 3.5 مليار دولار إلى هذا المبلغ[8]. الأكثر من ذلك أن الدول بدأت في الأعوام الأخيرة تجتمع وبخاصة تحت مظلة مؤتمر الأمم المتحدة للتجارة والتنمية (UNCTAD) لتطوير استراتيجية عالمية لزيادة تأثير مثل هذه البرامج التنموية. ورغم صعوبة الوصول إلى سياسات محددة لكي يجري تبنيها من قبل الدول فقد كان هناك اتفاق على المبادئ الأساسية حول كيفية إدارة الاقتصاد العالمي بطريقة أكثر عدالة وأكثر كفاءة. والهدف في جوهره هو أن تقوم الدول الصناعية بتنسيق سياساتها للحفاظ على استقرارية الاقتصاد العالمي ونموه وأن تخفف ضمن هذا السياق من مشكلة الديون وتجعل تدفق مساعدات واستثمار إضافيين إلى الدول الأقل نمواً ممكناً. وقد وافقت الدول الأقل نمواً من جهة أخرى على الحاجة لفتح اقتصادياتها بدرجة أكبر للاستثمارات الأجنبية إضافة إلى تحسين طريقة استخدام مواردها الوطنية[9].

وستعتمد علاقة الشمال بالجنوب في النهاية على أي حال على مدى التعرف على المصالح المتبادلة. وإذا ما تطلبت المصالح الذاتية للأمم غنيها وفقيرها قدراً أكبر من الاتكال المتبادل فسيكون هناك جهد أكبر لنقل الثروة والتكنولوجيا لتعزيز نظام العالم الاقتصادي. وفي ذلك السياق ستزداد فرص مواطني الدولة في المساهمة بالأسواق العالمية كلما ارتفع مستوى المعيشة فيها، وهذا بدوره سيعزز ثروة جميع الأمم. هذه المقاربة سترضي إحساساً في التوزيع العادل لكنها ستثير مسائل أخرى. والشيء الأهم، هل يمكن أجراء تحسينات الحياة في عموم أرجاء العالم من دون زيادة التلوث والضغط السكاني واستنزاف الموارد؟ لا يمكن إعطاء إجابة قاطعة لهذا السؤال وإذا ما كانت الإجابة بالنفي فستكون عملية النقل من الشمال إلى الجنوب سبباً في رفع مستوى الحياة على حساب العالم ذاته ولن تكون في مصلحة أي أحد في النهاية.

8 يجب الملاحظة أن عدة أقطار من أوبك كانت مع حلول سنة 1985 تتسلم صافية مساعدات التنمية. فثلاثة منها ـ إيران والعراق وقطر – كانت في تاريخ متأخر وهو 1978 مانحة صافية. وكان العراق وقطر معاً قد قدما أكثر من مليار دولار من المساعدات سنة 1980. وقد بدل هبوط أسعار النفط وحرب إيران ـ العراق قدرهم. وكانت أقطار أوبك تزيد من مساعداتها إلى الأقطار الأقل نمواً لغاية سنة 1980 حتى وصل مقدار المنح ذروته البالغة 9.6 مليار دولار. لكن دول أوبك كانت تقدم أقل من نصف ذلك المبلغ بعد أربع سنين. ولم تفد المبالغ المقدمة على أي حال في تخفيف الأزمة المالية للأقطار الأقل نمواً خارج الأوبك.

9 إن الاتفاق على المبادئ مدرج بصورة مختصرة في UNCTAD VII (July 9- Aug. 3, 1987) الذي نشرته Finance and Development التي يصدرها صندوق النقد الدولي والبنك الدولي. والمقالة المعنية المعنونة:

C. B. Boucher and W. E. Siebeck, «UNCTAD VII: New Spirit in North – South Relations?».

المراجع

Aiken, W. and H. LaFollette (eds.). *World Hunger and Moral Obligation*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice – Hall, 1977.

Anderson, D. and R. Fishwick. *Fuelwood Consumption and Deforestation in African Countries: A Review*. Washington, DC.: The World Bank, 1985.

Blair, J. *The Control of Oil*. New York: Random House, 1978.

Brown, L. R. (Project director). *State of the World 1986*. New York: Norton, 1986.

Cassedy, E. S. and P. M. Meier. «Planning for Electric Power in Developing Countries in the Face of Change.» *Planning for Changing Energy Conditions*. New Brunswick, N.J., U.S.A.: Transaction Books, 1988. (Energy Policy Studies; vol. 4).

Earl, D. E. *Forest Energy and Economic Development*. Oxford: Clarendon Press, 1975.

Eckholm, E. Planting for the Future Forestry for Human Needs. Washington, DC: Worldwatch Institute, 1979. (Worldwatch Paper; no. 26)

Ehrlich, P. R. *The Population Bomb*. New York: Ballantine, 1968.

and A. H. Ehrlich. *Population, Resources and Environment Issues in Human Ecology*. San Francisco: Freeman, 1970.

Fuller, B. *Operating Manual for Spaceship Earth*. New York: Pocket Books, 1969.

Goldemberg, J., [et al.]. *Energy for a Sustainable World*. Washington, DC.: World Resources Institute, 1987.

Gorse, J. and D. Steeds. *Desertification in the Sahelian and Sudanian Zones of Western Africa*. Washington, DC.:World Bank, 1987. (Technical Paper; no. 61)

Hardin, G. «The Tragedy of the Commons.» *Science*: vol. 162, 13 December 1968. pp. 1243-1248.

Jhirad, D. «Renewable Energy in Developing Countries: Priorities and Prospects.» *The Energy Journal* : vol. 8, special LDC issue, 1987.

Johansson, T. B., [et al.] (eds.). *Renewable Energy - Sources for Fuels and Electricity*. Washington, DC.: Island Press, 1993. This comprehensive review of renewable-energy technologies was commissioned by the United Nations Solar Energy Group on Environment as input to the 1992 United Nations Conference on Environment and Development in Rio de Janeiro.

Ophuls, W. *Ecology and the Politics of Scarcity*. San Francisco: Freeman, 1977.

Pachauri, R. K. *The Political Economy of Global Energy*. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1985.

Perrine, R. L. and W. G. Ernst (eds.). *Energy for Ourselves and Our Posterity*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.

Repetto, R. (ed.). *The Global Possible: Resources, Development and the New Century*. New Haven: Yale University Press, 1985.

Rivers of Energy: The Hydropower Potential. Washington, DC.: Worldwatch Institute,

1981. (Worldwatch Paper; 44)

Shrader-Frechette, K. S. *Environmental Ethics. Pacific Grove, CA.:Boxwood Press, 1981.*

Simon, J. *The Ultimate Resource. Princeton*, NJ: Princeton University Press, 1981.

State of the World -1994. Washington, DC.: Worldwatch Institute, 1993.

Welch, S. and R. Miewald (eds). *Scarce Natural Resources*. Beverly Hills, CA: Sage, 1983.

Wilson, C. L. *Coal- Bridge to the Future*: Report of the World Coal Study. Cambridge, MA: Ballinger, 1980.

The World Bank. *The Energy Transition in Developing Countries*. Washington, DC. 1983.

World Development Report 1987. New York: Oxford University Press, 1987.

World Enough and Time - Successful Strategies for Resource Management. New Haven: Yale University Press, 1986.

World Oil Trends. Chicago, Ill.: Arthur Andersen & Co.; Cambridge, Mass.: Cambridge Energy Research Associates, 1985-2000.

القسم الثاني
توليد القدرة:
التكنولوجيا وتأثيراتها

الفصل السادس

الوقود الأحفوري ـ الآثار والتكنولوجيا

الفحم

توفر أنواع الوقود الأحفوري ـ النفط والغاز الطبيعي والفحم ـ القدرة لمعظم التكنولوجيات التقليدية التي جرى بحثها في الفصل الثالث. ومع ذلك فحين نفكر بالوقود الأحفوري نفكر بصورة عامة أولاً بالنفط. فالنفط أكثر من أي مصدر أولي للطاقة حضوراً في حياتنا اليومية. فأسعار النفط وحظر تصديره واصطفاف السيارات أمام محطات التزود بالبنزين كلها تصنع الأخبار. ويبدو الفحم بالمقارنة ذا أهمية ثانوية. فنحن لا نقف صفوفاً من أجل الفحم ولا نسمع الكثير عن أسعاره. ومع ذلك سنقوم في هذا الفصل، المخصص للوقود الأحفوري، بالتركيز بدرجة أكبر على تكنولوجيا الفحم وأثره مقارنة بالنفط أو الغاز الطبيعي. ويجب أن يكون السبب واضحاً الآن. فالفحم كما رأينا أكبر مورد متوفر من الوقود الأحفوري ولديه القدرة مادياً على تزويد احتياجات العالم من الطاقة لقرون. وفي حين يمكن تطوير مصادر للطاقة متوفرة بصورة مفرطة مثل الاندماج النووي أو التكنولوجيا الشمسية واسعة النطاق إلا أن الفحم في حقبتنا هذه يبقى أكثر أنواع مصادر الطاقة التقليدية توفراً (انظر الفصل الحادي عشر). ومع تضاؤل تجهيزات النفط والغاز الطبيعي في العقود القادمة ربما يكون الفحم الوقود الذي سيعوض عنهما.

والفحم ليس البديل المثالي للنفط والغاز، وهناك في الحقيقة معالجات يمكن أن تحول الفحم إلى أشكال سائلة أو غازية رغم أنها لم تصل إلى حد الكمال بعد (انظر الملحق ج). ولا يمكن أن يحرق الفحم مثلاً بصورته الطبيعية في محركات الاحتراق الداخلي. وهذه المحركات كما لاحظنا في الفصل الرابع تشكل نسبة كبيرة من الطلب على الطاقة في الولايات المتحدة. ومع ذلك ينبغي ألا يستهان بأهمية الفحم. فهو يستخدم أولياً كوقود لتوليد البخار وبخاصة للتوربينات التي تولد الكهرباء

والتسخين الصناعي. فالاستخدام في الصناعة وفي توليد الكهرباء يؤلفان أكثر من 50 في المئة من الوقود المستهلك في الولايات المتحدة. ولا يزود الفحم كل هذه الاحتياجات، لكن يمكنه مع أخذ حجم الموارد بعين الاعتبار، فربما سيزود معظمها في العقود القادمة.

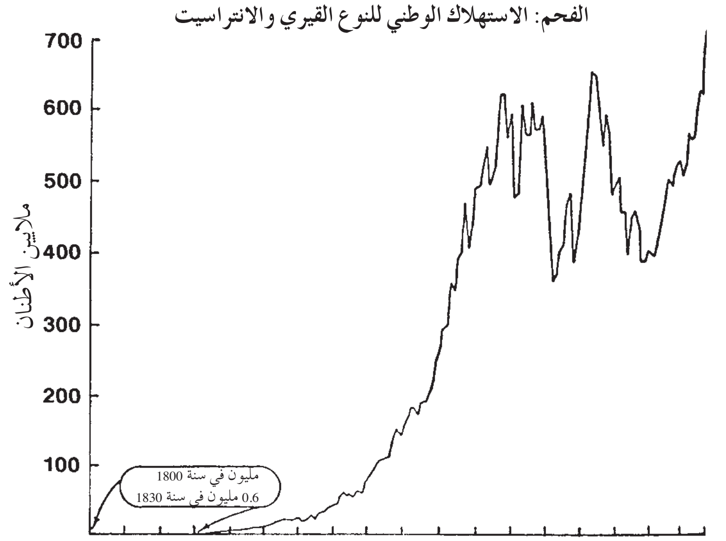
لقد اخترنا التركيز على الفحم لسبب آخر أيضاً. فالأمر لا يقتصر على كونه أكبر مصدر للوقود الأحفوري بل لأن له الأثر الأشد أثناء الاستخدام العادي. وتعود هذه المشاكل على الأكثر إلى ما يدعى الانسكابات أو المؤثرات الخارجية، الكُلَف غير المقصودة التي يتحملها المجتمع نتيجة استخدام تكنولوجيا. إن أي عملية تكنولوجية كبيرة بالطبع تحمل معها نوعاً من الخطورة لتأثيرات غير مقصودة. لكن الانسكابات يمكن في حالة الفحم أن تكون شديدة إلى درجة يمكن فيها أن تحدث ضرراً كبيراً للبشر والبيئة إذا لم يتحكم بها بعناية. ومعظم هذه التأثيرات لها ما يوازيها في تكنولوجيات النفط والغاز الطبيعي، وسنشير إلى بعض الأمثلة التي تتطابق تأثيرات الفحم فيها مع تأثيرات النفط أو الغاز. غير أن الفحم يوفر لنا أحسن مثال لتأثيرات تكنولوجيا الوقود الأحفوري ـ وهي تأثيرات تثير استفهامات تتجاوز إمكانية العمل التقنية وتشمل قيماً إنسانية أساسية أيضاً.

الفحم: الاستخدام التكنولوجي الحالي والمستقبلي

كان استخدام الفحم مرتبطاً بنشوء العالم الصناعي بطريقة لا انفصام فيها. غير أن استخدام الفحم بعد الحرب العالمية الثانية استبدل على مجال واسع بالغاز والنفط[1]. فلم يقتصر الأمر على توفر النفط والغاز بصورة واسعة بل إنهما برهنا على سهولة في الاستخدام وعلى كلفة أقل في النقل والخزن وكانا في غالبية الحالات أنظف من الفحم عند احتراقهما. ورغم الزيادة السنوية الكبيرة في استهلاك الطاقة في الولايات المتحدة إلا أن الطلب على الفحم تناقص في الحقيقة بنحو الثلث من الأربعينيات حتى الستينيات (انظر الشكل 6-1). والحقيقة أن مستوى الطلب عام 1943 البالغ 651 مليون طن لم يجرِ تجاوزه حتى عام 1975. ولم يزود الفحم أكثر من خمسة متطلبات الطاقة في الولايات المتحدة أثناء أزمة الطاقة بما في ذلك أقل من نصف الوقود لتوليد

1 كان الفحم قبل الحرب العالمية الثانية يستخدم بصورة واسعة في قاطرات السكك الحديدية، إضافة إلى استخدامه في توليد الكهرباء والتسخين الصناعي.

الكهرباء ونحو سدس الوقود لتزويد الحرارة في الصناعة. وكانت هذه النسب الصغيرة من إجمالي تجهيزات الطاقة بواسطة الفحم نموذجاً للاستخدام في الدول الصناعية الأخرى خلال نفس الفترة. غير أن استخدام الفحم ازداد مع الارتفاع الكبير في أسعار النفط وبخاصة لتوليد القدرة الكهربائية. وكان التغيير بطيئاً بسبب العوائق من قبل نفس الأوضاع غير المواتية في النقل والمناولة التي ساهمت في تدهور الطلب على الفحم في المقام الأول. وبحلول عام 1986 جهز الفحم 56 في المئة من متطلبات الطاقة لتوليد الكهرباء وكان ذلك يعادل كمية 15 كواد. وكانت خدمات توليد الكهرباء في الولايات المتحدة في الحقيقة وحدها تستهلك من الفحم سنوياً أكثر مما استهلكه القطر كله في أي عام واحدة قبل عام 1980. وهذا التوجه نحو زيادة استهلاك الفحم يتوقع استمراره. ويتوقع كذلك ازدياد الاستهلاك الكلي ليتجاوز ثلث طلب الطاقة في الولايات المتحدة. وربما يتجاوز استهلاك الولايات المتحدة مع حلول عام 2000 مليار طن في السنة، بزيادة بمقدار الثلث عن استهلاكه البالغ أكثر من 800 مليون طن أواخر الثمانينيات[2].



الشكل 6-1
الاستخدام التاريخي للفحم في الولايات المتحدة.

المصدر: U.S. Dept. of Energy (1980)

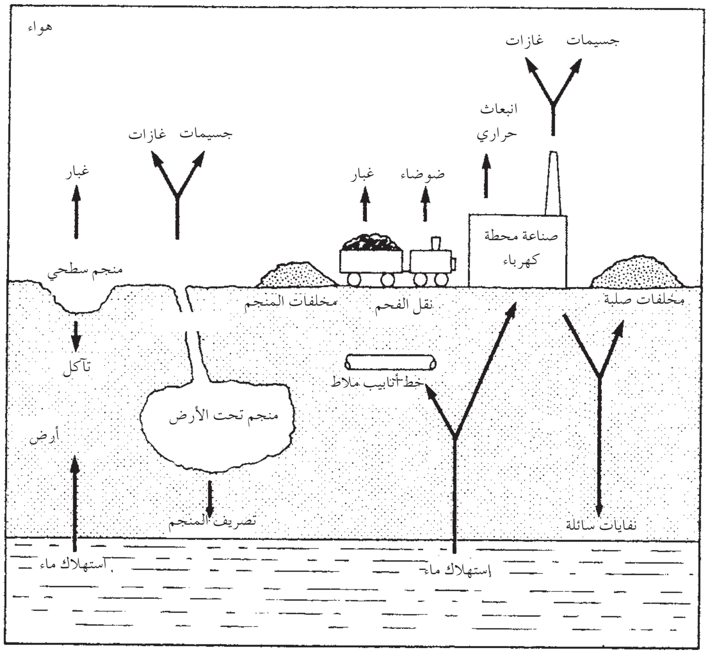
2 كان إنتاج الفحم في الولايات المتحدة سنة 1986 أقرب في الواقع إلى 900 مليون طن. وجرى تصدير 85 مليون طن واشترت أقطار أوروبا الغربية نصف ذلك المقدار تقريباً (Energy Facts 1986, Dept. Of Energy).

إن تنامي زيادة الطلب على الفحم يعتمد على عدد من العوامل: زيادة الطلب في قطاع الطاقة بصورة عامة، كلفة النفط والغاز، القيود البيئية، متطلبات التحكم بالتلوث، قيود على استخدام الأرض والماء، نفقات ومشاكل النقل. وكلما أصبح الفحم تدريجياً مكوناً أكثر أهمية في مزيج الطاقة لدينا سيصبح أثره في بيئتنا واقتصادنا، وربما في مجتمعنا مهماً.

الآثار التي يخلفها الفحم

قد يؤثر الفحم في الماء والهواء والأرض والحياة البرية كما يؤثر في صحة وسلامة الإنسان. ويمكن لهذه التأثيرات أن تحدث في أي من مراحل استخدامه بدءاً باستخراجه ونقله وإعداده واحتراقه... وانتهاء بالتخلص النهائي من مخلفاته العرَضية (انظر الشكل 6-2). ويمكن في كل خطوة من العملية أن تؤدي التأثيرات إن لم تجرِ السيطرة عليها إلى نتائج وخيمة.

علينا قبل أن نبحث في تفاصيل هذه التأثيرات للفحم أن نذكر نقطتين. **الأولى** أن أنواع الفحم ليست متشابهة ويتغير أثرها تبعاً لنوع الفحم المستخدم. النقطة **الثانية** هي أن الوضع الذي استخرج منه الفحم من حيث عمقه في موضع معين ومن حيث موقعه الجغرافي يجب أن يؤخذ بالاعتبار.



الشكل 6-2:

دورة استخدام الفحم

مقتبسة من: .Wilson (1980), and Office of Technology Assessment, US Congress (1979)

هناك أساساً أربعة أنواع من الفحم: الليغنيت وما تحت القيري والقيري والأنثراسيت. ويعطي الجدول 1.6 معلومات عن عينات تمثل كلاً من الأنواع الأربعة، ويبين أن أكبر كمية من الطاقة في الباوند وزناً توجد في الفحم الأنتراسيت. لكن احتياطيات الأنتراسيت قليلة ولا يستخدم إلا في عدد قليل من محطات توليد الكهرباء. ومن الواضح أن الفحم القيري وهو الثاني من حيث المحتوى الحراري يتفوق بدرجة كبيرة من حيث حجم الاحتياطي (الجدول 6-2). والحقيقة أن الاحتياطي لا يتصف بكميته الهائلة فقط، بل إنّه موزع على مساحات واسعة، كما يبين ذلك الشكل 6-3. غير أن الفحم القيري هو النوع الذي يحتوي على أكبر نسبة من الكبريت وهذا ما يفاقم من أثره السلبي كما سنرى. كذلك هناك مشاكل أخرى في الليغنيت وفي الفحم دون القيري. فالمحتوى الحراري لليغنيت هو الأوطأ كما إنّه يتفتت بسهولة، ما يجعل نقله وخزنه صعبين. أما النوع دون القيري وهو ذو محتوى كبريتي واطئ ومحتوى أعلى من الطاقة مقارنة بالليغنيت فيبدو مثالياً. لكن مشكلة موقع وجوده هنا تدخل على المشهد، إذ إن أكثر من 90 في المئة من احتياطياته تقع في مونتانا ووايومنغ. ويحتاج لتوزيعه على أرجاء الدولة نقله إلى مسافات تبلغ حتى 2000 ميل. وحاله في هذه المجال مثل أي سلعة أخرى، فكلما زادت المسافة الواجب نقلها زادت كلفة استخدامها. وموقع الفحم في الأرض مهم أيضاً. هل هو قريب من السطح بما فيه الكفاية، بحيث إنّ إزالة التربة السطحية كافية لتعريته فيجرف الفحم ببساطة؟ أو هل يجب حفر مهوى لمنجم كي يستخرج الفحم بأساليب الاستخراج تحت الأرض؟ ويجب ملاحظة أن أساليب الاستخراج السطحية والتي تحت الأرض كل منها له تأثيراته البيئية لكن تقنيات الاستخراج المختلفة تؤثر في كلفة الاستخراج ومدى الانسكابات.

استخراج الفحم

يعتبر استخراج الفحم عملاً بغيضاً، ويمكن أن يكون خطيراً. فالاستخراج من باطن الأرض وبخاصة في منطقة جبال الأبلاشيان في شرق الولايات المتحدة قد أصاب بالضرر تجهيزات المياه المحلية. فعندما ينساب الماء في المناجم وبخاصة المناجم المتروكة حيث لا توجد أي محاولة لسحب الماء يتفاعل الماء مع المركبات الموجودة في الفحم. وتتكون الأحماض مثل حامض الكبريتيك ثم يرشح في

الجدول 6-1: عرض لأنواع الفحم

نوع رتبة الفحم	اللجنيت	الشبه حُمري	الحُمري	الانتراسيتي
	بيانات مصانع الطاقة (%)			
مواقع مختارة	ماكلين شمالي داكوتا	شريدان وايومنغ	مهلنبيرغ كنتكي	لاغوانا بنسلفانيا
المكونات الفيزيائية				
الرطوبة	37	22	9	4
المواد الطيارة	28	33	36	5
الكربون المثبت	30	40	44	81
الرماد	6	4	11	10
المجموع	101	99	100	100
المكونات الكيميائية				
الكبريت	0.9	0.5	2.8	0.8
الكربون	41	54	65	80
بقية المكونات	58	45	32	19
المجموع	100	100	100	100
الطاقة (BTU/lb)	7000	9610	11680	12880

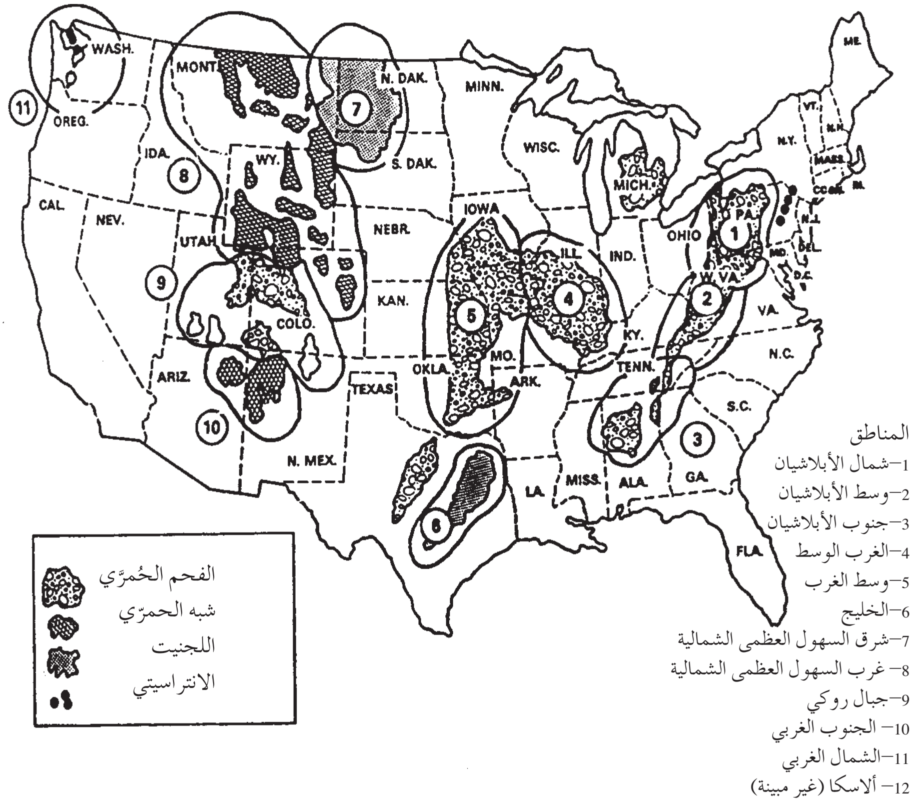
الجدول 6-2: كميات الفحم المتوافرة محلياً لعام (1979)

المحتوى الكبريتي(٪)	0.7	0.5	2.2	0.6
الاحتياطي المقدر بملايين الأطنان	42.9	182.4	241.9	7.3

المصادر: US Dept. of Emergy, Coal Data: Cost and Quality of Fuels (1079), Demoustrated Reserve Base of Coal in USA on January 1, 1979, May 1981.

الطبقات الصخرية المائية، ومن ثم يجري إلى الأنهار والجداول. وقد أصبحت آلاف الأميال من الجداول في الأبلاشيان ملوثة بصورة خطيرة ولا يمكن أن تدعم أي نوع من الحياة المائية.

وتتسرب الكيميائيات المحمولة في المياه من الفضلات التي تنفصل عن الفحم بعد استخراجه، وقد تراكمت في الأبلاشيان عبر العقود أطنان وأطنان من المخلفات دون أي اعتبار للتردي البيئي الكامن. وتشكل أكداس المخلفات منظراً غير جمالي ويمكن أن تكون مصدراً لتلوث الهواء أيضاً. ويمكن للمخلفات الحاوية مكونات قابلة



الشكل 6-3: التوزيع المناطقي لاحتياطيات الفحم في الولايات المتحدة

المصدر: Energy Information Administration, U.S Department of Energy (1981).

للاحتراق عند اكتنازها وتأكسدها أن تؤدي إلى احتراق ذاتي داخل الأكداس (Bethell & McAteer, in: Ridgeway, 1982). ويمكن للنار أن تبقى متقدة لسنين، نافثة الملوثات في الجو.

ويمكن للاستخراج من باطن الأرض أن يهدد استقرارية سطح الأرض كذلك. إذ يمكن لسنين من الحفر أن تتسبب بغوران التربة ـ انهيار فعلي في التربة السطحية. وقد تضررت أو هدمت مبانٍ بسبب انهيار الأرض بعد سنين على الأغلب من استغلال المنجم وإقفاله. وتبعاً لتقديرات حكومية، فإن مليوني آكر من الأرض قد غارت،

وهناك بضعة أضعاف هذه المساحة ما زالت مهددة. ويقدر مجوع الضرر الذي سببه غوران الأرض بمئات ملايين الدولارات (انظر: Penner & Icerman, 1976).

مهما كان الضرر الذي يسببه الاستخراج من باطن الأرض للبيئة وللناس بصورة عامة إلا أن هذه الأضرار طفيفة مقارنة بتلك التي واجهها العاملون في مناجم الفحم تاريخياً. فالتعدين تحت الأرض واحد من أخطر المهن في العالم. فمنذ بداية القرن العشرين قتلت الحوادث في مناجم الفحم في الولايات المتحدة ـ ومعظمها انهيارات أو انفجارات – ما يربو على مئة ألف من عمال المناجم وسببت إصابات لأربعة ملايين آخرين. وقد نجم عن حوادث المناجم في بداية القرن (العشرين) ما يزيد في المعدل على ألفي وفاة في السنة. وكانت نسبة الإصابات حتى الستينيات عالية. ففي السنة التي سبقت تشريع الكونغرس لقانون الصحة والسلامة في مناجم الفحم عام 1969 كان هناك 9450 إصابة و311 حادث وفاة بين عمال مناجم الفحم في الولايات المتحدة. ومع ظروف العمل الصعبة هذه ليس من المستغرب أن تكون علاقات العمال ـ الإدارة الصناعية في صناعة الفحم أكثر إثارة للنزاعات في الولايات المتحدة من أي صناعة أخرى.

رغم أن المعاناة الإنسانية من الحوادث كانت كبيرة إلا أنها تبدو باهتة بجانب المعاناة من الأمراض التي يسببها مباشرة استخراج الفحم. وكان هناك عام 1969 ما يربو على 50000 عامل منجم أو من كان يعمل في المناجم يعانون نتائج العمل لسنين في المناجم. وكانوا يعانون مرض اسوداد الرئة (نيوموكونيوسيس) وهي حالة ناجمة عن استنشاق غبار الفحم لفترات طويلة. وقد قيل إن هناك فرصة 50 ـ 50 لإصابة عمال المناجم بهذا المرض.

ربما يكون الاستخراج السطحي أقل عداء للعاملين، غير أن الضرر البيئي الناجم عنه أشد أثراً. فقبل إقرار الكونغرس لقانون التحكم بالتعدين السطحي والاستصلاح عام 1977 كانت عمليات استخراج الفحم السطحية قد تركت ندوباً على آلاف الأيكرات من سطح الأرض في الأبلاشيان والغرب الأوسط – مشوّهة إياها إلى درجة لا يمكن معها استصلاحها من أجل الاستخدام لأغراض أخرى. ويصح هذا في التخصيص عندما تستخدم تقنية الجدار العالي[3]. ويجري في هذه الطريقة التي

3 هناك في ما عدا تقنية الجدار العالي تقنيات أخرى. وأحد البدائل المعروفة هي تقنية الحفرة المفتوحة. وهذه التقنية توضح ذاتها. إذ تحفر الحفر العميقة، وما إن يستخرج الفحم حتى يجري استخدام العبء الزائد لإعادة ملء الحفرة.

استخدمت بكثرة في الأبلاشيان جرف الفحم من جانب أحد الجبال بدءاً في الموضع الذي يظهر فيه عرق الفحم على السطح. وكانت التربة والصخور السطحية والغطاء النباتي التي تغطي العرق ـ وهي تدعى العبء السطحي ـ تُجرف ببساطة في السابق وترمى إلى الأسفل بجانب التلة تاركة سفحاً شديد الانحدار. وتترك هذه الطريقة في أحسن الأحوال أكواماً كريهة المنظر تدعى أكوام المواد التالفة. غير أن الصخور من العبء السطحي غالباً ما تتدحرج على سفوح التلال إلى الحقول وحتى إلى فناءات البيوت الخلفية[4]. ويستمر الحفر في الوقت ذاته نحو مركز الجبل حتى يصبح هناك جدار عمودي من فتات الصخر ربما يصل ارتفاعه إلى مئة قدم أو يزيد، ويصل طوله إلى بضعة أميال حيث كانت هناك تربة ونبات – جدار يترك عمودياً وأجردَ متى ما جرى استغلال عرق الفحم هناك (انظر: Dorf, 1978).

وبجانب تخريب سطح الأرض يصيب الاستخراج السطحي مصادر المياه بالضرر حاله في ذلك حال الاستخراج تحت الأرض. والحقيقة أن الحامض المتسرب من العمليات السطحية وسفوح المواد التالفة بسبب الاستخراج السطحي كانت أسوأ من حالة العمليات داخل الأرض.

أشار البعض إلى الكلف البيئية والإنسانية لاستخراج الفحم كسبب رئيس لتباطؤ عملية التوسع في استخدام الفحم. وكما سنرى في هذا الفصل لاحقاً يمكن على أي حال التخفيف من هذه المشاكل إن لم يجرِ إيجاد حلول لها بواسطة التكنولوجيا. غير أن من المناسب أن نلاحظ أن استخراج الفحم قد يترتب عليه قضايا اجتماعية واقتصادية لا تتوفَّر لها حلول سهلة.

ربما تكون قضية استخدام الأرض أكثر القضايا أهمية من الناحية الاجتماعية نتيجة التوسع في استخراج الفحم. فبعض الفلاحين والأميركيين الأصليين (أي الهنود الحمر) من مالكي الأرض التي توجد تحتها حقول واسعة للفحم يعارضون استخراج الفحم في هذه الحقول، بغض النظر عن الحوافز المالية التي تعرض عليهم. فالقيم الفردية تعطى أسبقيات أعلى. ويفضل الفلاحون أن تترك أراضيهم على حالها لا

4 يصف أحد شهود عملية التعدين بالتعرية (حسب رواية Chapman, 1983) في الخمسينيات كيف تدهورت التربة والصخور في باحات البيوت وحدائقها الخلفية. وكانت عملية الاستخراج مدمرة بدرجة أجبرت ثلاثة أرباع ساكني المنطقة على تركها والانتقال إلى موقع آخر.

لسبب سوى أن عوائلهم كانت تستغلها لأجيال. وقد رفض بعض هؤلاء بصورة قاطعة أن يبيعوا أو يؤجروا أرضهم للتعدين السطحي، ذلك لأن الارتباط التقليدي إلى الأرض يأخذ الأسبقية على الربح.

وربما يضع الأميركيون الأصليون قيمة أعظم على بعض الأراضي القبلية ليس لأنها كانت بحوزتهم لمدد أطول بل لأنها تمثل رمزاً ثقافياً للقبيلة كلها. وكما قال أحد أفراد الشييني الشماليين «هذه آخر قطعة من الأرض نملكها وإذا ما فقدناها سنكون هنوداً من دون أرض في المستقبل» (مقتبسة من: Ridgeway, 1982). ويقال في بعض المواقف، في الحقيقة أن الأرض لها معنى يتجاوز حتى القيمة الثقافية لها. وقد نسب البعض قيمة دينية أو أخلاقية إلى أرضهم أيضاً. ولا يمكن في أي حالة أن يعوض عن مثل هذه الأرض وبأي طريقة. وسيتضارب موقف كل من الفلاح والقبائل الأميركية الأصلية مع بقية المجتمع إذا ما اتخذ سياسة هادفة بزيادة استغلال الفحم. وليس هناك الكثير الذي يستطيع مجتمع حر أن يفعله لإجبار أي فرد على التخلي عن أرضه باستثناء تشريع قوانين قسرية.

شحن الفحم وإعداده

يجب نقل الفحم من موقع استخراجه إلى موقع استخدامه. والحقيقة أن 10 في المئة من الفحم يحرق عند مدخل المنجم لغرض توليد الكهرباء. غير أن البقية يجب أن تشحن ويصبح النقل هماً متزايداً مع التوسع في استخدام الفحم. وأنظف أنواع الفحم كما لاحظنا يستخرج في الغرب بعيداً عن مراكز الاستهلاك الرئيسة. وإذا ما أردنا التوسع باستخدام الفحم فسنواجه إما مشكلة حرق فحم غير نظيف أو مشكلة نقل الفحم لآلاف الأميال.

وينقل الفحم في الولايات المتحدة بواسطة مراكب نهرية أو بالقطارات أو بسيارات الشحن. غير أن أكثر من النصف يشحن بالقطارات. وغالباً ما يوضع الفحم من الغرب في ما يدعى قطارات الوحدات ـ وهي قطارات تشمل 100 عربة للفحم أو أكثر – تحمل 10000 طن في كل رحلة من المنجم. وتسير هذه القطارات على خطوط مؤسسة تمر خلال المدن والبلدات عادة. ويعتقد أن زيادة استخدام الفحم سيزيد من عدد حوادث السكك الحديد، فعندما يمر قطار وراء قطار خلال المناطق المأهولة

سيربك ذلك الحياة اليومية (Horwitch, in: Stobaugh & Yergin, 1983). ويمكن إذا ما بنيت سكك جديدة أن تتمكن القطارات من تجنب بعض المراكز السكانية أو أن تسير على سكك معلقة فوق مستوى حركة المرور في المدينة. غير أن مثل هذه الحلول ستكون مكلفة. وإذا ما تحملت شركات سكك الحديد الكلفة فسيزيد ذلك من كلفة الشحن من دون شك وسيزيد ذلك من كلفة الفحم ذاته. وقد كان هناك مواقف حتى في الظروف الحالية حيث كان من الأنسب لبعض المدن الأميركية أن تستورد الفحم من الخارج بدل نقله من الغرب بسبب ارتفاع أجور الشحن بالسكك الحديد (Horwitch).

والبديل من النقل بالسكك هو ملاط الفحم (Coal Slurry) حيث يجري طحن الفحم ومزجه مع الماء وإرساله في خطوط أنابيب. وفي هذا فوائد أولها أن المراجل تستخدم الفحم المطحون. فبعد إزالة الماء وتجفيف الفحم يكون ملاط الفحم جاهزاً للاستخدام. وطريقة النقل بأنابيب الملاط أرخص من النقل بالسكك. ويمكن لخط أنابيب واحد أن يأخذ محل قدر كبير من حركة المرور بالقطارات. فخط أنابيب ملاط الفحم المدعو بلاك ميزا يبلغ طوله 273 ميلاً وينقل سنوياً ما مقداره 5 مليون طن من رواسب الفحم في منطقة بلاك ميزا في أريزونا إلى محطة كهرباء في نيفادا. ويحتاج هذا إلى 150 قطاراً سنوياً إذا ما استخدمت السكك الحديد.

غير أن خط أنابيب بلاك ميزا غير اعتيادي وستكون هناك مقاومة لبناء خطوط أخرى مثله ـ وبخاصة حول مسائل مثل استخدام الأرض وحقوق المياه. فخطوط الملاط مثل السكك الحديد والطرق تحتاج إلى شريط من الأرض لا يتعارض معه شيء ويدعى «المَحْرم». وكانت السكك الحديد قد استحصلت في القرن التاسع عشر على مساحات واسعة جعلت منها محرمات. ولم تكن هذه الامتلاكات محبوبة وغالباً ما كان ينظر إلى مالكي السكك الحديد بصفتهم مخربين للأرض. وستحتاج بعض خطوط الملاط المقترحة إلى محرمات مع ما ينجم عنها من نزاعات حول استخدام الأرض. وستلاقي محاولات بناء خطوط أنابيب ملاط معارضة إضافية على وجه التأكيد على أسس بيئية لأن الأثر التخريبي لها متوقع على طول مسارها. فبيئة الحيوان والنبات قد تتأثر بطريقة غير مواتية من عملية البناء وحسب. وقد تنشأ أيضاً تسربات من خطوط الملاط، وذلك يمثل ضرراً بيئياً بسبب طبيعة ماء الملاط الحامضية.

ومع ذلك، فإن قضية النزاع الكبرى ستدور حول حقوق الماء في الأغلب. فخطوط ملاط الفحم تحتاج إلى كميات هائلة من الماء وخط بلاك ميزا مثلاً يحتاج إلى 2700 غالون من الماء في الدقيقة. وحقوق الماء قضية حساسة بشكل خاص في أراضي الفحم الغربية لأن الماء شحيح نسبياً هناك. وقد عارض مربو الماشية والفلاحون الذين يعتمدون على المصادر المحلية استخدام الماء للملاط. وفي عام 1983 قاد أعضاء الكونغرس من الولايات الغربية المعركة ضد لائحة تسمح ببناء خطوط أنابيب الملاط[5]. لذا فإن أي تطوير جديد واسع المدى لخطوط الملاط سيثير معارضة أخرى.

أما في ما يخص عملية إعداد الفحم للاستخدام فهي تتألف من سحقه وتنظيفه لتحقيق احتراق محسن ونظيف. وهناك إمكانية حدوث ضرر بيئي بسبب إنتاج وسائل الإعداد لكميات كبيرة من النفايات ولاستهلاكها كميات كبيرة من الماء. ومع ذلك فإن الأثر البيئي لعملية الإعداد ذاتها في حالات التشغيل الاعتيادية واطىء.

احتراق الفحم

يحوّل الاحتراق الفحم إلى طاقة حرارية مفيدة (كما رأينا في الفصل الثالث) لكن الاحتراق أيضاً جزء من العملية الذي تنشأ عنه أكثر الهموم البيئية والصحية. فاحتراق الفحم يطلق أنواعاً من ملوثات الهواء بما فيها الجسيمات المعلّقة وثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين وأول أكسيد الكربون وبعض الدقائق الصغيرة. ويُنتج ثاني أكسيد الكربون من عملية الاحتراق أيضاً. وفي حين لا يعتبر على وجه الدقة ملوثاً (لكونه ناتجاً طبيعياً من كل أنواع الاحتراق)* إلا أنه رغم ذلك ذو أهمية كبيرة، كما سنبحث في ذلك لاحقاً.

والملوث الرئيس من احتراق الفحم اليوم هو ثاني أكسيد الكبريت (SO_2) والتوليد الكهربائي إضافة إلى التسخين في الصناعة مسؤولان عن 90 في المئة من انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت، ويأتي 70 في المئة منها من محطات القدرة الكهربائية. ويسبب

5 اشتركت السكك الحديدية والبيئيون في تحالف غير مألوف مع الفلاحين في معارضتهم للملاط. وتطابقت مصالح السكك الحديد في هذه الحالة من حيث رغبتهم في السيطرة على نقل الفحم مع كره البيئيين لتطوير خطوط الأنابيب.

* كما إنه أحد مكونات الهواء الاعتيادية ولو كان ذلك بنسبة ضئيلة.

ثاني أكسيد الكبريت، ضرراً واسعاً للبنايات (مثل تاج محل) ويمكن أن يخرب المنحوتات المصنوعة من حجر الكلس والرخام والمواد المشابهة، كما يفاقم صدأ المعادن.

غير أن ثاني أكسيد الكبريت مشكلة أكبر بكثير حين يتعلق الأمر بالصحة العامة لأنه يسبب تهيج الجهاز التنفسي. ويمكن أن يفاقم بتراكيز كبيرة الأمراض التنفسية الخطيرة وحيثما يكون التركيز عالياً جداً يمكن أن يؤدي إلى أعداد كبيرة من الوفيات. ويجب أن يلاحظ أن الأدلة على معظم هذه الوفيات هي (وبائية)، أي إنها مشتقة من إحصائيات الصحة العامة. ولا يمكن نتيجة ذلك تشخيص كون سبب موت الضحايا المباشر هو التلوث. ومع ذلك فقد لوحظ أن نسبة الوفيات وبخاصة بين المجموعات الأكثر عرضة للتأثر مثل العجزة والمرضى المزمنين ترتفع فجأة في فترات التراكيز الأعلى لثاني أكسيد الكبريت. والحقيقة أن مستويات تلوث الهواء كانت خلال هذا القرن عالية بدرجة سببت معها مئات الوفيات. ففي عام 1952 مثلاً حدثت أكثر من 3900 حالة وفاة في لندن، أكثر من المتوقع خلال فترة أربعة أيام من التلوث على مستويات عالية جداً حيث كانت مستويات ثاني أكسيد الكبريت مرتفعة على وجه الخصوص[6] (Wilson, [et al.], 1980).

تحدد مواصفات نوعية الهواء التي وضعتها حكومة الولايات المتحدة كثافة الملوثات ضمن مناطق معينة حسبما يدعى قيم العتبة. وتبعاً لهذا المفهوم تصبح التأثيرات الصحية عند هذه المستويات ذات أهمية لكل ملوث (انظر الجدول 3.6 والمناقشة في الملحق ب). ولدى الدول الصناعية الأخرى مواصفات مماثلة لنوعية الهواء. وما زالت اختلافات الرأي ماثلة مع ذلك حول ملائمة هذه المواصفات لحماية الصحة العامة.

---

6 ازدادت مستويات ثاني أوكسيد الكبريت في لندن خلال هذه الواقعة بثمانية أضعاف انظر: (Wilson [et al.], 1980) وقد حدثت كوارث مشابهة متعلقة بتلوث الهواء خلال هذا القرن في أصقاع أخرى من العالم. وعلى سبيل المثال سبب تلوث الهواء في تشرين الأول/ أكتوبر 1948 موت ما يقدّر بـ 20 شخصاً في بلدة دونورا في بنسلفانيا وتمرض أكثر من 10000 شخص يؤلفون نصف السكان.

الجدول 6-3:

التأثيرات الصحية وتراكيز العتبة، ومواصفات نوعية الهواء وهوامش السلامة لملوثات الوقود الإحفوري

نوع الملوث	أقل وأفضل التقديرات لعتبة مؤثرة	التأثير المعاكس	المواصفة القياسية	النسبة المئوية لهامش السلامة (أ)	
				أقل وأفضل التقديرات لعتبة مؤثرة	لكافة تقديرات أفضل الآراء
ثاني أكسيد الكبريت	300–400 □g/m^3 (مدى قصير)	حصاد الوفيات	365 $\mu g/m^3$	لا يوجد	لا يوجد إلى 37
	91 □g/m^3 (مدى طويل)	زيادة وتيرة الأمراض التنفسية الحادة	80 $\mu g/m^3$	14	212-14
كبريتات معلقة	8$\mu g/m^3$ (مدى قصير)	زيادة التهابات في الرئة	لا يوجد	لا يوجد	لا يوجد
	8 $\mu g/m^3$ (مدى طويل)	الربو	لا يوجد	لا يوجد	لا يوجد
مجموع الجسيمات العالقة	70 - 250 □g/m^3 (مدى قصير)	تفاقم الأمراض التنفسية	260 $\mu g/m^3$	لا يوجد	لا يوجد إلى 15
	100 □g/m^3 (مدى طويل)	تفشي التهاب القصبات المزمن	75 $\mu g/m^3$	33	133 -33
جسيمات دقيقة (قطر 10μa >)	(مدى قصير)	تغلغل عميق في نسيج الرئة. تفاقم الربو والتهاب القصبات	150 $\mu g/m^3$	—	—
	(مدى طويل)		50 $\mu g/m^3$	—	—
ثاني أكسيد النيتروجين	141 $\mu g/m^3$ (مدى طويل)	زيادة شدة الأمراض التنفسة المزمنة	100 $\mu g/m^3$	41	370 - 41
أول أكسيد الكربون	23mg/ m^3 (8hr)	تناقص تحمل الجهد	10 mg/m^3	130 (ب)	610 -130 (ب)
	73mg/ m^3 (1hr)	لدى مرضى القلب	40 mg/m^3	82 (ب)	788 - 82 (ب)
المؤكسدات الكيموضوئية	200 $\mu g/m^3$ (مدى قصير)	زيادة الحاسية للالتهابات	160 $\mu g/m^3$	25	لا تأثير إلى 363

(أ) هامش السلامة = تأثير العتبة – المواصفة القياسية / المواصفة القياسية × 100

(ب) تستند هوامش السلامة إلى مستويات الكاربو أكسيهيموغلوبين التي تكون 100 في المئة للمواصفة القياسية (8 ساعات) بمدى تقديرات رأي يتراوح بين 40 و100. ويكون أوطأ عامل سلامة لمواصفة ساعة واحدة 67 إلى 400 في المئة.

المصدر: NAS, NRC (1977), EPA (1994).

أما الملوثات الأخرى التي لا يفهم تأثيرها جيداً فتشمل أكسيد النيتروجين (NOx، حيث إن x هو عدد صحيح يشير إلى مركب الأكسيد الخاص) والمؤكسدات الفوتوكيميائية ذات العلاقة وخاصة الأوزون (O_3) (وتنجم المؤكسدات الفوتوكيميائية من تفاعل أكاسيد النيتروجين مع الهيدروكاربونات). ونصف هذه تقريباً تأتي من مصادر مثل الأفران والمراجل التي تحرق الفحم في حين ينبعث النصف الآخر من مصادر متحركة مثل السيارات والشاحنات. ويسبب تركيز الاثنين في موقع معين ما يدعى (الضباب الدخاني (Smog)) الذي كان حوض لوس أنجليس الهوائي يعاني منه بصورة خاصة. وينجم عن الضباب الدخاني شدة تنفسية وتهيج للعيون مثلما يسبب فساداً جمالياً وتحديداً للرؤية. والملوثات الباقية هي الجسيمات الدقيقة وأول أكسيد الكربون. وتختلف الجسيمات في مداخن غازات الفحم المحترق في الحجم ما بين 0.01 ميكروميتر (حيث إن $\mu m = 10^{-6}$ meter) إلى $10 \mu m$ قطراً. والجسيمات الأصغر حجماً ذات دولة $0.01 \mu m$ هي الأخطر على الصحة. ويعتقد أنها تترسب في الجهاز التنفسي وتضيف إلى الضيق التنفسي المرتبط بالتلوث. وأول أكسيد الكربون (CO) منتوج طبيعي لاحتراق الكربون في الفحم كما في النفط ويؤثر بتراكيز عالية على القلب[7].

ورغم الجهود للتقليل من أول أكسيد الكربون وأكاسيد النيتروجين والأوزون إلا أن حكومة الولايات المتحدة أفادت أن تراكيز أول أكسيد الكربون والأوزون في كثير من المناطق المدينية كانت في عام 1987 أعلى مما منصوص عليه في المواصفات. وسجلت لوس أنجلوس، حيث تولد السيارات التي تحرق البنزين معظم التلوث في الهواء، 144 يوماً كانت فيها مستويات أول أكسيد الكربون والأوزون أعلى من مستوى العتبات.

ورغم أن تلوث الهواء هو أكثر التأثيرات المحلية وضوحاً لحرق الفحم في موضع الاستخدام إلا أن له تأثيرات بيئية في المناطق البعيدة كذلك. يعتقد العديد من العلماء أن ملوثين من كافة عمليات احتراق الوقود الأحفوري (وبخاصة حرق الفحم) يسببان المطر الحامضي. ورغم أن الأدلة في هذه الفترة ليست نهائية بصورة جازمة إلا أن

7 يضعف أول أوكسيد الكاربون قابلية الدم على حمل الأوكسجين. وهذا بدوره يجهد الجهاز القلبي – الدوراني مما يجعل الناس ذوي المشاكل بالقلب عرضة بصورة خاصة للأذى في تراكيز عالية من أول أوكسيد الكاربون (انظر Harrison, 1975).

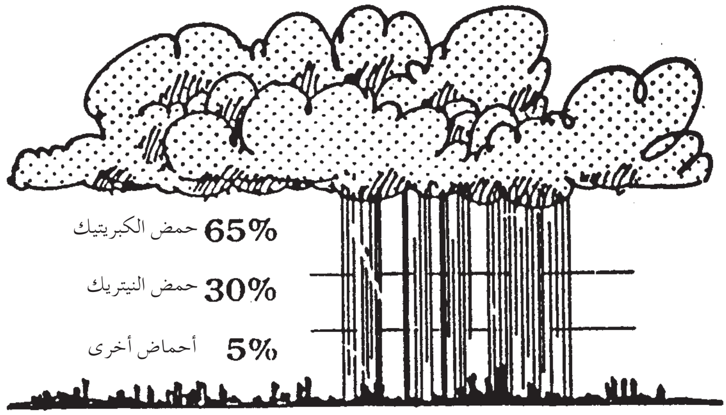
هناك مؤشرات قوية باتجاه أكسيد الكبريت وأكسيد النيتروجين كمصادر أولية للمطر الحامضي. فالحامض في المطر الحامضي نصفه إلى ثلثيه حامض كبريتيك ومعظم البقية حامض نيتريك (انظر الشكل 6-4 أ). وتبعاً لمعظم النظريات، فإن الحوامض تتكون في طبقات الجو العليا حيث تتحول الأكاسيد إلى كبريتات ونترات ثم تتفاعل هذه مع الرطوبة لتكوين الأحماض. ثم تسقط هذه الأحماض مع المطر.

وقد سجل أعلى تراكيز للمطر الحامضي في شمال شرق الولايات المتحدة وشرق كندا. لكن يشعر معظم العلماء أن معظم مكونات المطر الحامضي تنتج في الغرب الأوسط الأميركي وتحمل الرياح السائدة الكيميائيات مئات من الأميال شرقاً. وقد شهدت بعض مناطق الشمال الشرقي في أي حال مطراً حامضياً غير طبيعي. وتمتلك الأمطار عادة تعادلاً حامضياً عندما تقاس على مقياس يدعى قيم الأسس الهيدروجيني (أو pH) يبلغ 5.6. لكن أمطاراً بقيم تتراوح بين 5.0 نزولاً (حامضية بتزايد: انظر الشكل 6-4ب، ج) تسجل بصورة منتظمة في بعض الأماكن. وقد كان للمطر الحامضي أثر مدمر على البحيرات والجداول في شمال شرق الولايات المتحدة وكندا. فهذه الكتل المائية مع ازدياد حموضتها، فقدت بصورة تدريجية مخزونها من السمك وبقية الأحياء المائية. وقد لاحظ المهتمون بالطبيعة في السنين الأخيرة تأثيرات ضارة في أنواع أخرى من الحياة البرية مثل أنواع خاصة من الأشجار، وفي الزراعة، ويتوقعون أن هذه التأثيرات ستنمو وبصورة أوضح ما لم يجرِ تحكم أفضل بالتلوث.

التخلص من الفحم

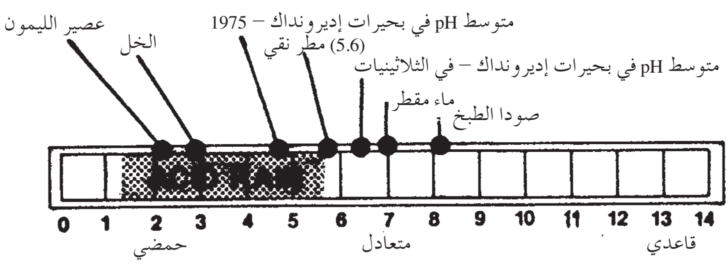
تنتج كل منشأة تحرق الفحم فضلات صلبة (مثل الرماد المتطاير من المدخنة ورماد القعر في أسفل الفرن) وكل هذه يجب التخلص منها. ورغم أن هذه المنتوجات لا تشكل إلا نسبة صغيرة (حجماً أو وزناً) من مدخول الفحم إلا أن مقاديرها المجردة كبيرة بسبب الكميات الهائلة المستخدمة من الفحم. فمحطة بقدرة 1000 MWمثلاً تعمل لمدة يوم تحرق ما يقارب عشرة آلاف طن من الفحم. وإذا ما كانت الفضلات تشكل عشرة في المئة فستبلغ ألف طن يجب التخلص منها كل يوم عمل.

وتدور قضية التخلص من الفضلات الصلبة حول قضية استخدام الأرض، إذ يجب تهيئة مناطق كبيرة للدفن، إما أن تكون قرب كل موقع توليد أو في مواقع متوفرة للنقل واطئ الكلفة (بالقطار أو بالنقل المائي). وهذا ما قد يصعب العثور عليه، وبخاصة

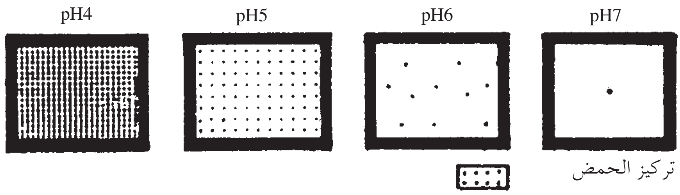


المكونات النمطية للأمطار الحمضية في منطقة الشمال الشرقي لأميركا

(أ)



(ب)



الشكل 6-4:

المطر الحمضي (أ) مكونات المطر الحمضي، للمطر النقي قيمة pH تتراوح بين 5.6 إلى 5.7 ويدخل في هذه القيم اعتبارات كمية الحموضة الناتجة من تفاعل ماء المطر مع مستويات ثاني أكسيد الكربون الجوي الاعتيادية. أما المترسبات الحمضية (من مطر، وثلج، وجليد أو بَرَد) فلها قيمة pH تساوي 5.6 أو أقل.

(ب) إن مقياس pH (تركيز الأسس الهيدروجيني) هو مقياس تركيز أيون الهيدروجين. فأيونات الهيدروجين موجبة كهربائياً وتدعى (كاتايون) وتعرف الأيونات بشحنة سالبة (آنيون). والمادة الحاوية على تراكيز متساوية من الكاتايون والآنيون بحيث تتعادل الشحنات، فلها قيمة pH تبلغ 7 والمادة التي فيها أيونات هيدروجين أكثر من الآنيون حامضية فلها رقم pH أقل من 7 والمواد التي فيها آنيون أكثر من الكاتايون تكون قاعدية ورقم pH فيها أكثر من 7، وهكذا مع تزايد تركيز أيونات الهيدروجين ينخفض رقم pH مع زيادة الحموضة.

المصدر: U. S. Environmental Proctection Administration (1980)

عندما تكون المنشأة في موقع مكتظ بالسكان، حيث تصبح أماكن الدفن عرضة للاستخدام المفرط. ويجب مراعاة الحذر عند اختيار هذه الأماكن للفضلات لأسباب جمالية كما لأسباب بيئية. والهم البيئي الخاص هنا مثلما في بقية تكنولوجيا الفحم هو الخوف من تسرب الكيميائيات الضارة إلى المياه الجوفية.

تكنولوجيات التحكم وكلفتها

من الممكن تقليل الأثر البيئي من استخدام الفحم. لكن كم هو مقدار التخفيض الضروري؟ وكم هو المرغوب فيه؟ إن مقدار الخفض والتحكم المطلوبين كانا واقعياً موضع نقاش لقرون. فمثلما رأينا في الفصل الأول قامت السلطات في لندن في القرن الرابع عشر بمنع حرق الفحم بصورة كاملة بسبب الدخان الوسخ الذي ينتجه. نجد اليوم اتفاقاً عاماً على الحاجة لبعض التحكم وهناك التكنولوجيا اللازمة للتعامل معها. لكن تقليل آثار الفحم يحمل معه في الأغلب كلفاً مالية باهظة.

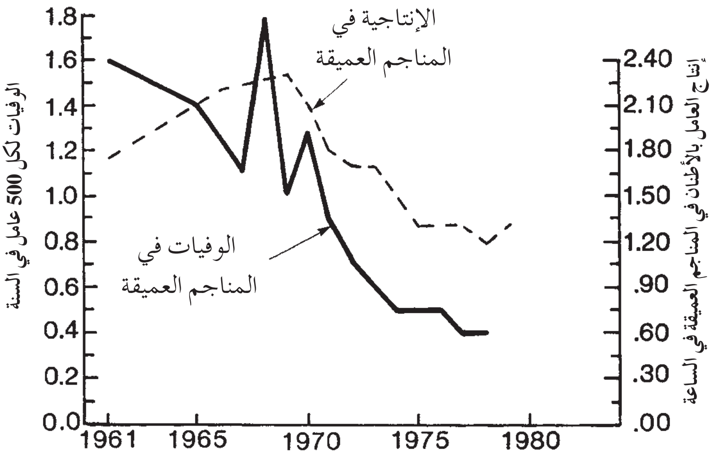
التحكم بالاستخراج

في التعدي تحت سطح الأرض. يمكن تقليل الضرر على الأملاك والتردي البيئي (تسرب الحامض والحرائق المنفلتة وانخساف الأرض) باستخدام أساليب عمل أكثر حذراً حين يجري العمل في المنجم. فمن الممكن مثلاً بعد الاستخراج أن تنهار أنفاق المنجم بأسلوب مسيطر عليه لتجنب الإزالة إمكانية حدوث انهيارات غير مسيطر عليها في ما بعد. ويمكن كبديل ملء الأنفاق بمخلفات الاستخراج أو مخلفات عملية الإعداد. وكانت دراسة (انظر: Wilson, 1980: وكافة القيم الظاهرة هنا قد صححت من دولارات 1978 إلى دولارات 1987) قد قدرت كلفة إصلاح المناجم تحت الأرض بين دولارين وثمانية دولارات للطن المستخرج.

وكانت التحسينات بالنسبة إلى الصحة والسلامة لعمال المناجم مطلوبة منذ تشريعات 1969 وقد دخلت التحسينات قيد العمل بالفعل. ومثلما نرى في الشكل 6.5 فإن عدد وفيات عمال المناجم لكل 500 عامل قد انخفض بصورة مشهودة منذ عقد الستينيات. ويعود هذا جزئياً إلى معدات أفضل وتدريب أفضل. فالمكائن قد تحسّنت، كما إن العمال ينالون تدريباً أوسع في استخدامها. وهناك عناية أكثر تبذل لمنع انهيار السقوف. فالصخور الواقعة من السقوف كانت مسؤولة عن 40 في المئة

من كافة حوادث الموت في المناجم في السبعينيات. وعادة يجري تأمين السطوح فوق مستوى العرق المستخرج بواسطة مسامير السطوح التي تغرس في الصخر عميقاً. وقد قلل الانتباه الذي أولي إلى إسناد السطوح في أنفاق المنجم عدد الانهيارات بصورة عامة بمقدار الثلثين بين عامي 1969 و1977.

وقد حسّنت شركات الفحم من تهوية المناجم أيضاً. ففي الماضي كانت الغازات التي تتواجد متراكمة مع الفحم (وبخاصة الميثان) تتجمع في الأنفاق تحت الأرض وتنفجر إذا ما أصابتها شرارة. وهناك أفكار لتقليل مستوى الخطر أكثر من هذا. وأحد أفكار استخراج الفحم في المستقبل يهدف إلى إلغاء إمكانية حصول انفجار بواسطة إزالة كل الأكسجين من مهوى المنجم. ولكون الأكسجين ضروري في الاحتراق، فإن غيابه يجعل الانفجار مستحيلاً. ومن ناحية أخرى سيحتاج العاملون في هذه الحالة إلى أجهزة تنفس مفردة.



الشكل6-5 : السلامة والإنتاجية في مناجم الفحم العميقة

المصدر: U. S. General Accounting Office, March 1981. Low Production in American Coal Mining. ، Adapted from Chapman,1983.

وتساعد التهوئة أيضاً في تقليل حالات الرئة السوداء لأنها تقلل مستوى غبار الفحم المعلق. ويقلل استخدام رشاشات الماء عند عروق الفحم من مستويات غبار الفحم أيضاً. وقد بيّنت إحدى الدراسات في الحقيقة أن التحسينات في السيطرة على

الغبار يمكن أن تقلل إصابات النيوموكونيوسيس أكثر من 90 في المئة. (انظر: Chapman, 1983).

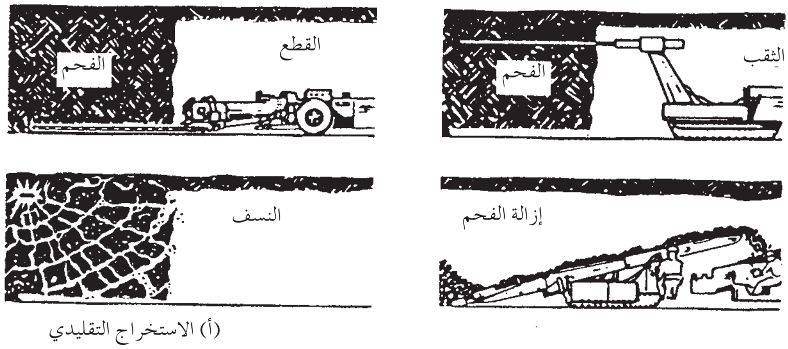
لكن تحسين مستوى السلامة في المنجم وتوفير مستلزمات الصحة لا تقتصر كلفتهما على المعدات الجديدة وحسب، بل إن لهما كلفة في إنتاجية العامل. فانخفاض عدد الوفيات كما يبين الشكل 6-5 صاحبه في البدء انخفاض موازٍ تقريباً في الإنتاجية، فتناقصت كمية الفحم المستخرج في الساعة من قبل العامل. فكّر مثلاً في تأثير تثبيت السطوح بالمسامير على عملية الإنتاج. فلكي يمنع انهيار السطح يجب إجراء التثبيت قبل استخراج الفحم لأن الذبذبات الناتجة عن عمليات الثقب والحفر قد تزحزح الصخور الرخوة بالقرب منها. يجب نتيجة ذلك إيقاف العمل كل بضعة أقدام أثناء استخراج الفحم لتوفير الفرصة لتثبيت مسامير جديدة. وتتطلب أعمال هدم أو إعادة ملء الأنفاق وتركيب أنظمة تصريف مياه أفضل وبقية الإجراءات البيئية عمالة يمكن خارج هذه الأعمال توجيهها لأعمال استخراج الفحم، لذا فهي تؤثر في الإنتاجية وتقللها أيضاً.

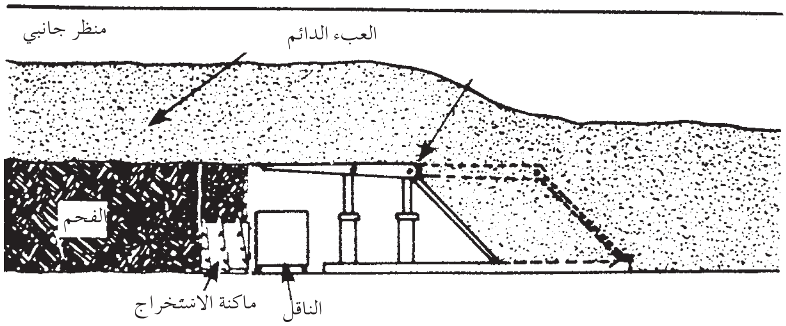
غير أن الإنتاجية مع نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات بدأت ترتفع عموماً. وهذا ناتج جزئياً عن تحسن تقنيات التعدي وآليته. وأكثر الابتكارات أهمية في التعدي تحت سطح الأرض هي تقنية الجدار الطويل (الشكل 6-6). وتستخدم هذه التقنية آلة كبيرة يمكنها استخراج جدار فحمي طوله 5000 قدم. وتقوم آلة القطع بتناول كل خطوة من عملية الاستخراج. ففيها شفرات قاطعة هائلة الحجم تشرِّح عروق الفحم وتقوم المعدات بجمعه ما إن يتساقط لتضعه على حزام ناقل لتجميعه وإخراجه من المنجم. وعادة تسير الآلة على سكة وتمتلك نظاماً هيدروليكيّاً مسيّراً ذاتياً لدعم السقف يزيل الحاجة إلى مسامير السطوح (انظر: Dorf, 1978).

ورغم أن مثل هذه الآلات كفوءة في الأغلب إلا أن المكائن الجديدة والإجراءات الجديدة في المنجم تضيف نحو عشرة دولارات إلى كلفة الطن للفحم (دولارات 1987). وهذه الأرقام تتطلب بعض التوضيح على أي حال. ولا تستخدم جميع المناجم طريقة الجدار الطويل، إذ إنها في الحقيقة ليست فاعلة دائماً، وتكون بعض التقنيات الأخرى أحياناً أرخص، وما يكون مجدياً من حيث الكلفة لمشغّل واحد قد لا يكون مجدياً لآخر. وأخيراً فإن كافة شركات التعدين في الولايات المتحدة تتنافس

في السوق نفسه وعليها أن تستوفي السعر نفسه للنوع نفسه من الفحم تقريباً. لذا فهي تميل إلى البحث عن مقاربة للمشاكل البيئية ومشاكل السلامة ذات الكلفة الأقل لحالاتها الخاصة.

ويمكن أيضاً التحكم بالكثير من الآثار السلبية للاستخراج السطحي وهذا التحكم مطلوب بموجب القانون الاتحادي للسيطرة على التعدين السطحي والاستصلاح لعام 1977. ويجب تبعاً لهذا القانون إعادة تشجير الأرض التي جرى فيها تعدين سطحي وإعادتها إلى «ما يقارب تموجها الأصلي» وإلى قابليتها للاستخدام ثانية.





الشكل 6-6: تقنيات استخراج الفحم تحت الأرض.(أ) التعدي التقليدي (ب) الجدار الطويل

المصدر: .U. S. Department of Energy (1981)

ومع ذلك فليس استصلاح كافة الأراضي بالأمر السهل. إذ يجب أن يسهل المناخ عملية الاستصلاح وأهم نقطة هناك هي أن معدل المطر السنوي يجب أن يتجاوز عشرة إنشات. لذا فإن فرص نجاح جهود الاستصلاح في بعض المناطق الغربية حيث

يكون مستوى المطر أقل من ثمانية إنشات ضئيلاً جداً. أما فحم المناطق الغربية الأخرى مثل مناطق البراري المعشبة في وايومنغ ومونتانا وشمال داكوتا ومنطقة البونديروزا الصنوبرية في كولورادو ويوتا ومونتانا فتمتلك فرص نجاح استصلاح أراضيها إذا ما عولجت بطريقة مناسبة (انظر: NAS, 1974.)



(أ)



(ب)

الشكل 6-7: إعادة استصلاح أراضي الفحم (أ) المنطقة في وسط الصورة لأراضي استخراج فحم سطحي مستصلحة في منطقة البونديروزا الصنوبرية وشجيرات الجبال قرب أكمي في وايومنغ (ب) نتيجة للإهمال. أكوام المخلفات المهجورة قرب فايرستيل في جنوب داكوتا. وقد استدعت سياسة الاستصلاح إعادة المناطق البرية إلى حالتها الطبيعية وجمالها الأصلي.

المصدر: National Academy of Science (1974), Copyright © by The Ford Foundation.

وتعتمد عملية استصلاح الأرض جزئياً على نوع الأرض الواجب استصلاحها. فإعادة إصلاح الأرض الزراعية يتطلب مثلاً اختزان التربة السطحية أثناء عملية التعدين. ويقومون في ألمانيا بخزن التربة التحتية ثم إعادتها أيضاً. وهذا ما يسهل من عملية الاستصلاح لكنه يضيف مبالغ كبيرة إلى الكلفة بحيث لا تكون مجدية إلا حين تكون عروق الفحم سميكة بدرجة خاصة. ويمكن استخدام الأنقاض كذلك لإعادة ملء حفر المناجم إضافة إلى التربة. وقد أجرت صناعة الفحم تجارب على استخدام رماد الفحم (وهي تقنية مفيدة لمحطات الكهرباء الواقعة قرب فتحة المنجم) وكذلك المخلفات البديلة لغرض الاستصلاح. إن نتائج الاستصلاح الجيد للأراضي البرية يمكن ملاحظته في الصورة 6-7 (أ) ومقارنته بنتائج سياسة «عمل – لا شيء» كما تبدو في الشكل 6-7 (ب).

إن الكلفة الكلية لإعادة إحياء الأرض من التعدين السطحي يمكن أن تتباين بطريقة هائلة. فقد تكون الكلفة في الغرب بحدود 1000 دولار للآكر، بينما تصل بالأراضي الزراعية في أوهايو إلى نحو 8000 دولار. وقد جرى تقدير متوسط كلفة إعادة إحياء الأرض من آثار التعدين السطحي على مستوى عالمي بنحو 5 دولارات للطن المستخرج (انظر: Wilson, 1980,1987).

التحكم بعمليتي الإعداد والشحن

إن وقع إعداد الفحم يجري التحكم به حالياً بطريقة مباشرة. فالفضلات يجب أن تفصل ويجري التخلص منها بأسلم طريقة ممكنة والماء الذي يستخدم لغسل الفحم يجب أن يرشّح أو يعاد تدويره لإزالة الحوامض والكيميائيات الضارة التي قد ترشح إلى تجهيزات المياه من دون ذلك. وهذه المشاكل بسبب كمية الفضلات وحجم الماء ضخمة رغم كونها واضحة. وتستخدم بعض الفضلات بدل تكديسها بشكل أكوام قبيحة لإعادة ملء المناجم. وقد أجريت تجارب لمعالجة أكوام الفضلات بطريقة مشابهة لسطوح مناطق التعدين أي إن الأكوام تصنف وتعالج بحيث يمكن استخدامها لإنماء النبات.

ورغم ذلك فمن الممكن أن تتفاقم مشاكل الإعداد في المستقبل. فقد أبدت صناعة الكهرباء اهتماماً في تطوير عمليات تقوم بتنظيف الفحم بطريقة أكثر تكاملاً. وهذه المصانع التي تدعى (مصافي الفحم) لا تقوم بتنظيف الفحم من الشوائب سهلة

الإزالة فقط، بل تزيل الجزء الأكبر من الكبريت فيه أيضاً. ويجري الآن غسل الفحم لإزالة دقائق الكبريت الموجودة على الفحم لكنها لا تزيل الكبريت المرتبط بالفحم داخله. ويمكن لهذه المصافي تحويل الفحم الوسخ إلى نظيف مزيلة بذلك الحاجة لتحكم إضافي عند حرق الفحم. لكن إزالة الكبريت المرتبط يتطلب تحضيرات إضافية بما في ذلك معالجة الفحم ببكتيريا تتغذى على الكبريت أو معالجته بالمذيبات الكيميائية.

وبإمكان أي من الخيارين إذا لم يحسن التعامل معهما داخل المصنع أن يحدثا تهديدات بيئية إضافية. ويجب في الوقت الحالي على أي حال إثبات كفاءة وجدوى كلفة هذه الطرق قبل أن تؤهل للاستخدام.

أما بالنسبة إلى النقل فيبدو أنه أقل المراحل مشاكل مما يستوجب السيطرة عليه من موقف تكنولوجي وتسود هنا الاهتمامات الاجتماعية والسياسية.

ومع ذلك فهناك كلفة للتحكم. فالحاجة إلى الحفاظ على نقاوة الماء من الملاط، كما هي حال السيطرة على الآثار الممكنة من زيادة النقل بالسكك الحديد ستضيف ما يقدر بـ 0.72 دولاراً لكل طن (دولار 1987).

التحكم بالاحتراق

إن أهم مشكلة وأكثرها كلفة في تكنولوجيا الفحم هي التحكم بمنبعثات الاحتراق. وهناك أساساً سؤالان مرتبطان. ما مقدار التحكم بالتلوث وإلغائه الذي نرغب به، وكم ستكون كلفة ذلك؟ فالتحكم الصارم بالتلوث ممكن في الحقيقة إذا ما برزت الحاجة. لكن كلفة استخدام هذه التكنولوجيا قد تزداد بدرجة قابلة للقياس اعتماداً على مستوى التحكم التي يطلبها المجتمع.

إن إلغاء 90 في المئة من التلوث كما يمكن أن نراه في الجدول 6-4 سيضاعف كلفة مصنع جديد ثلاثة أضعاف. لذا فمن غير المدهش استمرار الجهود البحثية، بالرغم من وجود تقنيات التحكم حيث إن التركيز منصب على تقليل كلفتها[8].

---

8 وقد أفاد إيان تورنس (Ian Torrens) من معهد بحوث الطاقة الكهربائية في مؤتمر عن المطر الحامضي في نيسان 1988 عن نظام متقدم لإزالة ثاني أوكسيد الكبريت يتوقع أن تكون كلفته نحو 20 إلى 50 في المئة أقل في البدء وأنه يوفر ما يصل إلى 40 في المئة في كلف التشغيل مقارنة بالتكنولوجيات الحالية.

لكن المواصفات المحلية والوطنية وجهود الولايات المتعلقة بنوعية الهواء جعلت الاستثمار لغرض تكنولوجيا التحكم في التلوث أمراً إجبارياً. فإطالة المداخن التي تحمل الدخان ونواتج الاحتراق الأخرى ببساطة مثلاً مطلوب في بعض الحالات لأنها تساعد على منع التراكيز العالية للملوثات (ومن السخرية أن إطالة المداخن ربما تكون ساهمت في مشكلة المطر الحامضي من حيث المساعدة على نفث الملوثات إلى أعلى بسرعة). والمداخن العالية وهي بسيطة في مفهومها وغير مكلفة ولا تفعل أكثر من تشتيت التلوث. أما التقنيات الأخرى المستخدمة الآن في المصانع التي تستخدم الفحم فتحاول إعادة الإمساك بالملوثات في دخان الفحم أو منعها من التكون في المقام الأول.

الجدول 6-4: كلفة التنظيم البيئي للتوليد من الفحم

الكلفة التقليدية سنة 1969 لمحطة جديدة	183 دولاراً/ للكيلوواط
التضخم العام	191 دولاراً/للكيلوواط
كلفة الحماية البيئية الجديدة	795 دولاراً/ للكيلوواط
الكلفة الكلية للمحطة الجديدة (Somerset New York 1981)	1169 دولاراً/ للكيلوواط
التغيير في المنبعثات الملوثة للهواء 1969 - 1981	
ثاني أكسيد الكبريت	-95%
الجسيمات	-97%
أكسيدات النيتروجين	-80%
معدل الإنخفاض	-91%
نوع المعدات الجديدة المطلوبة الآن	
برج تبريد لمنع تدفق الحرارة إلى الخارج وقتل الأسماك	
إزالة جسيمات محسنة	
نظام شطف ثاني أكسيد الكبريت	
وقاية رواسب ورماد الكبريت	
مدخنة أعلى	
معالجة المخلفات في الموقع	
الاستمرار بمراجعة المواصفات: مرة واحدة أسبوعياً على المعدل	

المصدر: معاد طبعها من Duane Chapman, Energy Resources and Energy Corporations

لقد كانت المرسبات الكهروستاتيكية مستخدمة منذ زمن بعيد لإزالة الجسيمات العالقة في دخان الفحم. وتعمل التقنية بقاعدة بسيطة للجذب الإلكتروستاتيكي

(الفكرة نفسها المسؤولة عن انجذاب حاجات صغيرة وخفيفة إلى بالون مطاطي للأطفال بعد فركه بملابس صوفية). فالجسيمات في الدخان تتأين بواسطة مجال كهربائي شديد القوة بين قطبي مرسب الكتروستاتيكي. وما إن تتأين (Ionized) الجسيمات حتى يتم اقتناصها على الأقطاب. وتجري إزالة الجسيمات عن الأقطاب والتخلص منها بين فترة وأخرى. ويمكن لمرشحات مصنوعة من قماش أن تؤدي نفس المهمة ويدعى واحدها (Baghouse). والمرشحات أساساً تشابه أكياس جهاز التنظيف بالفراغ (Vacuum Cleaner) تمر نواتج الاحتراق خلالها. وتقوم الأكياس أثناء ذلك بترشيح الجسيمات (انظر: Wilson, [et al.] 1980). وتقوم محطات الكهرباء التي تستخدم الفحم من خلال استخدام هاتين الوسيلتين باقتناص الجزء الأكبر والأكثر وضوحاً للعيان من الجسيمات وتزيل العناصر التي سببت المنظر الداخن لمعظم المدن. وإذا ما قمنا ثانية بالنظر في كلفة التحكم المضاف إلى كلفة الفحم الإضافية ذاتها فسيكلف التحكم بالجسيمات نحو ثلاثة دولارات للطن (دولارات 1987).

وتطلبت ملوثات الهواء الأخرى الأقل ظهوراً للعيان تقنيات مختلفة. والأكثر أهمية هو أن المواصفات الوطنية الحالية عن الهواء النظيف تتطلب تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت ما بين 70 و90 في المئة[9]. وأفضل التقنيات المتوافرة لإزالة ثاني أكسيد الكبريت تتمثل بجهاز الغسل (Scrubber) أو مزيل الكبريت لغازات العادم. وهي التقنية المنصوص عليها لإزالة الكبريت في قانون الهواء النظيف المعدل لعام 1977.

وتعمل أغلبية التقنية الحالية لإزالة الكبريت من غاز المداخن على نفس الطريقة تقريباً (الشكل 6-8). غازات احتراق الفحم تمر خلال محلول قاعدي رطب من أكسيد الكالسيوم (النورة) أو كربونات الكالسيوم (حجر الكلس مثلاً).

ويتفاعل المحلول الذي يرش خلال جهاز الغسل بهيئة ملاط قاعدي مع الكبريت ويزيله من الغاز. وفي حين أن هذه الطريقة فاعلة في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت إلا أنها تحتاج إلى كميات كبيرة من الماء (ألف غالون في الدقيقة لمحطة قدرتها ألف ميغاواط) وتترك رواسب وحلية وهو ما يمثل مشكلة للتخلص منها بحد

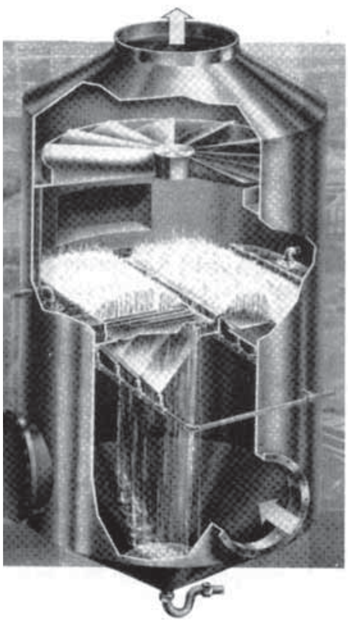
---

9 كانت هذه الاتفاقية لإزالة الكبريت نتيجة تنازلات تشريعية في الكونغرس (انظر: Haskell, 1982).

ذاتها. والطريقة مكلفة، إذ إن إعادة تجهيز محطة قديمة بالغاسلات يكلف ما يصل إلى 300 دولار للكيلوواط من سعة المحطة (أو 300 مليون دولار لمحطة قدرتها 1000 ميغاواط). ومثلما يبين الجدول 4-6 ستكون تلك الكلفة مساوية أو تزيد على كلفة محطة كاملة جديدة لعام 1959. وتضيف تقنية الغاسلات الحالية على أسس موازية لكلفة الفحم ما يصل إلى 31 دولاراً للطن (1987. انظر: Wilson, 1980).

وتقنية إزالة الكبريت من غاز المداخن تزيل أيضاً الجسيمات وأكسيدات النيتروجين إلى حد ما. لكن إزالة أكسيدات النيتروجين بصورة ملموسة تحتاج بصورة عامة إلى معالجة مختلفة يمكن أن تكون بعد أو خلال عملية الاحتراق.

والعديد من المراجل في أوروبا واليابان مزوّدة بنظام اختزال أكسيد النيتروجين حيث يجري مزج الأمونيا مع أكسيدات النيتروجين في المدخنة[10]. من ناحية ثانية تنصب الجهود في الولايات المتحدة على تقليل أكسيدات النيتروجين خلال عملية الاحتراق.



الشكل 8-6: غاسلات نزع الكبريت من غاز المدخنة.

مقتبسة من: FMC Environmental Equipment Co.

10 تتطلب هذه التقنية استخدام حفاز كيميائي. وهذه التقنية التي تدعى الاختزال الانتقائي بالحفز تحول أكسيدات النيتروجين إلى نيتروجين وماء (موصوف في EPRI Journal, January/ February 1988 عدد كانون ثاني/ شباط 1988).

إن أكسيدات النيتروجين تتكون من خلال امتزاج الهواء بالوقود لكن المدى الذي تتكون فيه يعتمد على مزيج المادتين وعلى درجة حرارة الاحتراق. وتصمم محطات القدرة الجديدة بفرن قليل التوليد للأكسيدات حيث يجري التحكم بالمزيج ودرجة الحرارة بصورة دقيقة لتقليص انبعاث الأكسيدات. والزيادة في الكلفة الرأسمالية للأفران واطئة التوليد للأكسيدات قليلة نسبياً، لكنها تقلل الانبعاثات بحدود 40 إلى 60 في المئة[11]. ومنذ تشريع قانون الهواء النظيف أصبح التحكم بأكسيد النيتروجين (مثلما هو الحال مع ثاني أكسيد الكبريت) مطلوباً في المحطات الجديدة. وقد كانت هناك عدة لوائح قوانين أمام الكونغرس تتطلب إعادة تجهيز المحطات القديمة كذلك.

لا توجد في الوقت الحالي أي تقنيات تحكم فاعلية انبعاثات أول أكسيد الكربون أو الجسيمات الدقيقة في المحطات التي تحرق الفحم. ويجب أن نلاحظ أن معظم التلوث بأول أكسيد الكربون مصدره السيارات والشاحنات التي تحرق البنزين وليست المحطات التي تحرق الفحم. وينص قانون الهواء الصافي (Clear Air Act) وتعديلاته على تقليل انبعاث أول أكسيد الكربون من قبل صنّاع السيارات وهو ما تم إنجازه كما هو الحال مع أكسيدات النتروجين من خلال تحكم أفضل في عملية الاحتراق.

وقد تحدث بعض الاختراقات في تقليل انبعاثات أول أكسيد الكربون والجسيمات الدقيقة من المحطات العاملة بالفحم من خلال تحسينات في عملية احتراق الفحم كذلك. والتقنية الواعدة أكثر من غيرها حالياً هي احتراق الطبقة المميعة (Fluidized Bed Combustion) الذي سيبحث بالتفصيل في الملحق (ج). وهذا النوع من الاحتراق يتيح حرقاً أكثر كفاءة في درجات حرارية أوطأ، وهذا لا يقلل من انبعاث أول أكسيد الكربون والجسيمات الدقيقة فقط بل يتعداهما إلى التقليل من أكسيدات النيتروجين وثاني أكسيد الكبريت أيضاً. وقد حققت بعض المشاريع الكبيرة للعرض معايير الانبعاث من دون الحاجة للغاسلات.

11 تبعاً لـ EPRI Journal لا تضيف المراجل واطئة التوليد لأكاسيد النيتروجين إلا أقل من 5 دولار/ لكيلوواط لكلفة محطة فحم جديدة سعة 1000 ميغاواط ولا يشغل هذا إلا جزءاً ضئيلاً من الكلفة الكلية.

التخلص من الفضلات

تتطلب المنشآت التقليدية التي تحرق الفحم بتكنولوجيا عقد الثمانينيات التخلص من أطنان من الرماد وكذلك أوحال جهاز الغسل والغبار المجمّع في المرسبات الكهروستاتية. وينتج من الغاسلات كميات كبيرة من المواد للتخلص منها فإذا ما سكبت الأوحال الناتجة من محطة سعة 1000 ميغاواط في السنة على الأرض فستوفِّر غطاء بسماكة قدم عمقاً على مساحة قدرها ميل مربع. ومع ندرة مواقع السكب لملء الفجوات الأرضية تبحث صناعة الكهرباء عن طرق منتجة للتخلص من الرماد والوحل. وتستخدم بعضها فضلات الفحم كما لاحظنا في عمليات استصلاح المناجم السطحية. لكن المؤسسات تحاول إيجاد استخدامات أخرى. وتشمل المفاهيم رماد التعدي في تقصي المعادن النادرة في الرماد مثل الكوبالت والكروم وتكرير الوحل لإزالة عنصر الكبريت وحمض الكبريتيك. التفكير في التخلص من فضلات التعدي وإعادة تدويرها يمكن أن يسمح للمؤسسات ببيع المنتجات الجانبية لعملية الاحتراق والتحكم بالتلوث ما سيوفر ربحاً مالياً صافياً يقلل من كلفة السيطرة البيئية الكلية.

الكلفة الكلية لعمليات السيطرة

إن التقليل الكبير للآثار التي يتركها حرق الفحم ممكن تقنياً. ومع ذلك فإن هذه السيطرة تمثل كلفة سيقوم أصحاب العمل بتحملها في البدء لكن مستهلكي المنتوج لمحطات الكهرباء العاملة بالفحم سيتحملونها في النهاية. وبعبارة أخرى سنتحمل كلفة السيطرة الأشد على الآثار التي يتركها الفحم. ويتركز الجدل حول الحاجة إلى سيطرة إضافية تتجاوز تلك المنصوص عليها في التشريعات منذ السبعينيات. فالصناعات التي تعتمد على الفحم تمانع في دفع الكلف الإضافية لتقليل الآثار إلى درجة أكبر. غير أن البيئيين من ناحية أخرى يشعرون بالحاجة إلى بذل أكبر جهد ممكن للسيطرة على هذه الآثار قبل أن تتولد بغض النظر عن الكلفة.

وكما لاحظنا في الجدول 6-4 فالكلفة ليست بالهينة، إذ إن محطة توليد كهرباء تعتمد الفحم وفيها سيطرة على الانبعاثات تكلف أكثر بكثير من محطة بدون سيطرة. وقد تقلل المفاهيم الجديدة مثل أفران الطبقة المميعة كلفة السيطرة لكنها لم تبرهن حتى نهاية الثمانينيات على كونها مجدية من حيث الكلفة على مستوى واسع. وإذا ما جمعنا كلف

السيطرة خطوة خطوة باستخدام التكنولوجيا التقليدية فسنجد أنها ستزيد من كلفة الفحم بما يتراوح بين 25 و50 دولاراً للفحم المستخرج من المناجم العميقة وبنحو 18 دولاراً للفحم المستخرج من المناجم السطحية $1986. (انظر: Wilson, 1980).

وعلى الرغم من كون هذه الكُلف كبيرة على الزبون إلا أن سعر الفحم ما زال تنافسياً إذا ما قورن بالنفط خصوصاً. والحقيقة أن الفحم يحتفظ بالنسبة إلى توليد الكهرباء وبعض الاستخدامات الصناعية الأخرى بميزة محددة. فسعر الفحم المستخدم لتوليد البخار الذي تدفعه مصالح توليد الكهرباء في الولايات المتحدة يبلغ 46 دولاراً للطن المتري عام 1985 (IEA, 1986). وهذا يعكس سعراً يبلغ 1.70 دولاراً لكل مليون وحدة حرارية بريطانية ويشمل كلف الاستخراج والنقل (وكذلك كلف التحكم). وإذا ما أضفنا إلى ذلك كلف التحكم للانبعاثات والتخلص من الفضلات والتي تترواح بين 13 و32 دولاراً للطن فسيضيف إلى الكلفة أعلاه 0.5 إلى 1.28 دولاراً لكل مليون وحدة حرارية. ويعطي كلفة كلية تتراوح بين 2.22 دولاراً إلى 2.98 دولاراً لكل مليون وحدة حرارية. والكلفة المقارنة للتوليد باستخدام زيت الوقود وهو الجزء الثقيل من النفط تبلغ 4.84 دولاراً لكل مليون وحدة حرارية بريطانية (IEA, 1986). وهذا يشمل كلف الاستخراج والشحن والتكرير. وحتى من غير إضافة كلف السيطرة على الانبعاثات لحرق النفط والمطلوبة في عدد من المناطق الحضرية تبقى المقارنة في مصلحة الفحم.

وتبقى محطات توليد الكهرباء التي تحرق الفحم، كما سنرى في الفصل التاسع، حتى بإضافة كلفة السيطرة على المنبعثات أرخص بكثير من محطات التوليد التي تعتمد الطاقة النووية أكان ذاك في طور التشييد أو التشغيل، إذ يحتفظ الفحم بأفضلية سعرية على هذا النوع من الوقود أيضاً. ومن الواضح الآن أن الفحم كان تنافسياً في أوضاع السوق السائدة حتى أواسط الثمانينيات. وإذا ما ازدادت أسعار النفط ثانية لتصل إلى حدود 30 دولاراً للبرميل فستزداد الأفضلية السعرية للفحم.

أما بالنسبة إلى الكُلَف الإضافية التي يتحملها المستهلك فمن الصحيح أن السيطرة الصحية والبيئية وعلى السلامة تضيف إلى سعر البضائع المنتجة وإلى كلفة الكهرباء. لذا فإن السيطرة تعنى أن كلفة الطاقة ستأخذ نسبة مئوية أكبر من دخل كل مستهلك. لكن يمكن في الوقت ذاته أن نبرهن على أن الكُلَف الإضافية تعكس بصورة أقرب الكُلَف الحقيقة لهذه المنتوجات والخدمات لأن هناك كلفاً للمجتمع من دون سيطرة

عليها. وهذه الكُلَف هي مؤثرات خارجية. وفي حالة الفحم كانت كل الكلف غير الخاضعة للسيطرة والمؤثرة في الصحة والبيئة غير معكوسة سابقاً في سعر الفحم. لكنها كانت كلفاً حقيقية رغم ذلك.

وعندما يلغي التحكم أحد المؤثرات الخارجية تصبح الكلفة مؤثراً داخلياً، أي إن كلفة التحكم تنعكس في سعر السلعة. ففي حالة التحكم في الانبعاثات والتخلص من الفضلات مثلاً، سيمثل المبلغ الذي يتراوح بين 13 و33 دولاراً زيادة في سعر الفحم، وهو تحويل للمؤثر الخارجي إلى مؤثر داخلي لكلفة السيطرة على تلوث الهواء. وهناك بعض النفع للمستهلكين في الكلفة المضافة. وإذا كانت الأسعار تعكس كلف المنسكبات، فإن المستهلك يعرف بطريقة أفضل ما يدفعه.

التأثير عبر الحدود – المطر الحمضي

إن تدويل أي مؤثر خارجي له هدف اقتصادي واضح عندما ننظر في التحكم المحلي بتلوث الهواء. فالمستهلك يدفع أكثر لكي يحصل على المنتوج أو الخدمة وعلى الهواء النقي. لكن مشكلة المطر الحمضي تغير المعادلة. فكلف التنظيف قد لا يتحملها مستهلكو المنتوج، بل آخرون في موقع مختلف أو حتى في بلد مختلف. وشركات القدرة الكهربائية على وجه الخصوص عادة تكون محلية أو مناطقية. وتعكس الأجور المستوفاة من المستهلك الكلفة التي تتكبدها شركة تجهيز الكهرباء. وإذا ما أقر بأن المطر الحمضي يشكل مشكلة ضمن الحدود القومية فيمكن في هذه الحالة تقدير كلف التنظيف وتوزيع الكلفة كما تقر من قبل المشرعين أو ربما من خلال الضرائب القومية أو المحلية. لكن ما هو الحل إذا ما كان مصدر المطر الحمضي إحدى الدول وكان المطر يهطل في دولة أخرى؟ والمطر الحامضي عبر الحدود يعني أن الضحايا ليسوا حتى ضمن نفس قاعدة الضرائب، كما إنهم بالطبع ليسوا ضمن تعريفة الكهرباء نفسها. لذا لا يتوقع إيجاد حل لهذه القضية بصورة سهلة.

وقد وقع أحد النزاعات المهمة العابرة للحدود بين كندا والولايات المتحدة. فزيادة الأمطار والثلوج الحمضية في كيبيك وأونتاريو والمقاطعات البحرية في كندا أثار احتجاجات. ويدعى الكنديون معتمدين أدلة عَرَضية لتدعم قضيتهم أن أصل المطر الحمضي الذي يهطل هو منطقة الغرب الأوسط الأميركية. وقد طلبت الحكومة

الكندية من حكومة الولايات المتحدة اتخاذ إجراءات للتقليل من ذلك. غير أن إدارة ريغان رفضت على أي حال ولعدة سنوات الدخول في أي اتفاق مع كندا حول المطر الحمضي على أساس عدم توفر معلومات علمية متكاملة عن الظاهرة. لكن الحكومتين اتفقتا في عام 1983 على القيام بدراسة مشتركة عن المطر الحمضي وعلى تقديم توصيات حول السيطرة عليه. وبدا أن الدراسات أيدت وجهة النظر الكندية. فقد كانت الصناعة في أوهايو تحرق الفحم وتستخدم مداخن عالية مصممة لمنع التلوث المحلي لكنها تحمل المنبعثات عالياً في الجو، حيث تدفع الرياح الملوثات إلى أونتاريو وكويبيك وإلى شمال شرق الولايات المتحدة. ولم يكن باستطاعة الباحثين على أي حال أن يقولوا بطريقة جازمة كيف أن الملوثات كانت تتحول إلى مكونات المطر الحمضي. وقد خفف تقرير رسمي صدر عام 1987 عن الكونغرس من أهمية المطر والثلج الحمضيين. وهذا ما ترك مجالاً للتساؤل عن الحاجة لأي سيطرة إضافية.

وما لم يكن بالإمكان تجنبه هو التسييس الشديد للقضية. فقد ضغطت جماعات المصالح على طرفي الحدود على حكومتيهما لكي لا تنصاع للطرف الآخر. فمستخدمو الفحم في الولايات المتحدة لم يريدوا استثمار أموال كبيرة في معدات رأسمالية (والتي ادعوا أنها ستكلف 110 مليار دولار وهو رقم اختلف معه كثيرون) وحاولوا التأثير في الكونغرس لمنع إصدار أي متطلبات جديدة للسيطرة على تلوث الهواء. وكان لمعظم سياسيي الولايات المتحدة مصلحة أكبر في دعم الصناعة الأميركية بدل الانحناء أمام مطالب كندا. فالكنديون لا يصوتون لهم ولم يستلموا إلا القليل من المساعدة السياسية حتى عام 1988.

ومع ذلك فقد كانت هناك مناطق انتخابية في الولايات المتحدة تقف في صف كندا. فالولايات الشمالية الشرقية التي كانت تتاثر بتراكم الأحماض في بحيراتها بدأت تبحث عن طرق لإجبار مستخدمي الفحم في ولايات الغرب الأوسط على فرض سيطرة أشد على المنبعثات. وفي حزيران/ يونيو 1988 اتفق حاكم ولاية نيويورك مبدئياً مع حاكم أوهايو على وضع تشريعات أكثر صرامة على المنشآت التي تستخدم الفحم في الغرب الأوسط. وسيجري تحول المؤثر الخارجي جزئياً فقط إلى مؤثر داخلي يتحمله المستهلكون ضمن هذه الاتفاقية. وقد نص الاتفاق على تحمل

الصناعة جزءاً من الكلفة (والمستهلكين نتيجة لذلك)، كما ستغطى بقية الكلفة من خلال فرض ضرائب على النفط المستورد على مستوى قومي[12]. لكن الاتفاق بين حاكمي الولايتين لم يضع حداً نهائياً للمشكلة. فالكونغرس ما زال يواجه ضغوطاً كبيرة من الصناعة للتصدي للتشريعات اللازمة كما استمرت إدارة ريغان في معارضة أي وسائل سيطرة رئيسة جديدة. أما بالنسبة إلى كندا فرغم اتفاق حاكمي الولايتي الذي يلبي متطلبات العديد من الكنديين على المطر الحمضي، ورغم أن الإدارة وعدت بصورة غامضة بالتفاوض على معاهدة للتلوث عبر الحدود إلا أن كندا لا تملك إلا تأثيراً محدوداً في مشرعي الولايات المتحدة. وكانت الحكومة الكندية في الوقت ذاته لا تزال تتعرض لضغوط من مواطنيها لوضع حل بشروط ملائمة.

ويجب أن يلاحظ أن اتفاقيات من هذا القبيل قد جرى التوصل إليها عن المطر الحمضي في أماكن أخرى. فقد وقعت الدول الأوروبية عام 1979 على اتفاقية التلوث عبر الحدود[13] عامة، وأظهرت هذه الاتفاقية المشاكل المتأصلة في حل مثل هذه المشاكل. إذ كانت الاتفاقية عامة في لهجتها وتفتقد إلى آليات لتطبيقها. لكنها وضعت الحاجة إلى التحكم بالملوثات وبخاصة ثاني أكسيد الكبريت واتفق الموقعون مبدئياً على الأهداف الأساسية.

التأثير الكوني الكامن في ثاني أكسيد الكربون

هناك مجال للتحكم في غالبية التأثيرات البيئية لتكنولوجيا الوقود الأحفوري بما في ذلك المطر الحمضي. ورغم وجود تساؤلات عن الكلفة إلا أننا نعلم أن التكنولوجيا مجدية ويمكن أن تعمل على مجال واسع. غير أن مسألة تراكيز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) مختلفة.

فثاني أكسيد الكربون منتوج عام في دورة الحياة: إذ يجري امتصاصه من قبل

12 لا تزال الاتفاقية تحتاج إلى تدخل من جانب الكونغرس لتعديل قانون الهواء النظيف. والمسألة مشكوك في نتيجتها بسبب المعارضة التي تلقاها من مشرعي ولايات الغرب الأوسط وتأثيرات مصالح شركات الفحم في الغرب الأوسط.

13 جرى التوقيع على الاتفاقية عن تلوث الهواء البعيد المدى في جنيف في تشرين ثاني/ نوفمبر 1979. وكان التفاوض عليها قد جرى برعاية مفوضية الأمم المتحدة الاقتصادية لأوروبا ووقعتها الأقطار الأوروبية الغربية والشرقية (انظر: Ruster, 1982).

النباتات، كما إنه يتولد ويطلق خلال عملية التحلل (انظر الشكل 6-9). ويعتمد مستوى ثاني أكسيد الكربون في العالم على توازن هذه العمليات. وتتغير مستويات ثاني أكسيد الكربون في العالم عبر الزمن بصورة بطيئة جداً.

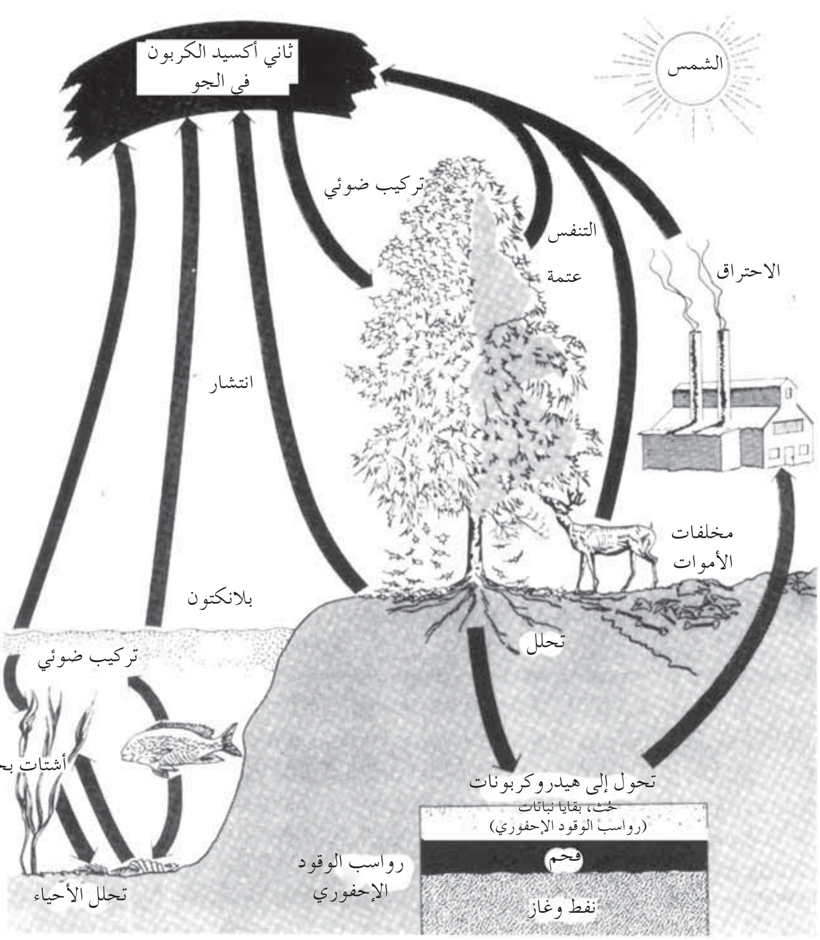
وثاني أكسيد الكربون أيضاً منتوج لعملية احتراق الهيدروكربونات في الفحم والنفط والغاز. ولا يمكن إلغاؤه من الاحتراق، كما لا يمكن تقليل كميته إلا بجهد وكلفة كبيرين. وستستمر انبعاثات ثاني أكسيد الكربون أساساً ما دمنا نستخدم هذه الأنواع من الوقود[14]. غير أن البعض يحاول أن يبرهن أن حرق الفحم وبقية أنواع الوقود الأحفوري في العالم أجمع يجعل تراكيز ثاني أكسيد الكربون ترتفع. وقد أثبتت قياسات علمية دقيقة عبر عقود زيادة بوتيرة بطيئة في تراكيز ثاني أكسيد الكربون (الشكل 6-10). ويضيف احتراق الوقود الأحفوري بعبارات مجردة 20 مليار طن من ثاني أكسيد الكربون في السنة إلى جو الأرض. ورغم جسامة هذا الرقم إلا أن هناك احتراقاً أكثر يأتي من مصادر أخرى. ويقدر ما تطلقة المحيطات سنوياً بـ 150 مليار طن، في حين ينتج من تحلل النباتات على اليابسة 65 مليار طن أخرى، وهذا الرقم يتزايد الآن بسبب التصحر. وتبلغ الزيادة السنوية في تركيز ثاني أكسيد الكربون حسب القياسات الفعلية جزءاً واحداً بالمليون في السنة (انظر الشكل 6-10). لكن الفرضية الأساسية هي أن هذه الإضافة كافية كعبء على المناخ لتسبب ازدياد مستويات ثاني أكسيد الكربون بسرعة كبيرة. ومع ازدياد كميات الوقود التي تحرق عبر العقود القادمة يتوقع تبعاً لهذه النظرية أن تتضاعف مستويات ثاني أكسيد الكربون مع حلول عام 2050.

وإذا ما حدث هذا فقد يزداد معدل درجة حرارة كرة الأرض ببضع درجات بسبب ما يدعى تأثير البيت الزجاجي. ويحدث تأثير البيت الزجاجي بسبب تناقص الحرارة المتسربة (بشكل أشعة تحت الحمراء) لتعود إلى الفضاء خلال الغلاف الجوي الذي يحتوي على مستويات عالية من ثاني أكسيد الكربون. ويسمح الغلاف الجوي مثل

14 تطلق كافة أنواع الوقود الأحفوري ثاني أوكسيد الكاربون عندما تحترق لأن الكربون جزء من تركيبتها الكيميائية – العضوية. أما الوقود من الكتلة الحيوية مثل الخشب ففيه أيضاً كربون في بنيته العضوية. لكن مصادر الوقود الحيوي تنحو إلى انقاص CO_2 في الجو لأنها تقوم بعملية تثبيته (خلال التركيب الضوئي) في مرحلة نمو النبات التي صنعت منه. وهناك في الفصل الحادي عشر وصف لأساليب إدارة الغابات التي تقوم تقريباً بموازنة دورة الكربون في نمو واحتراق أنواع الوقود ذات الأساس الخشبي. وقد حدث تثبيت الكربون بالنسبة إلى الوقود الأحفوري على خلاف ذلك قبل ملايين السنين عندما كان النبات الأصلي ينمو لذا فإن حرق الهيدروكربونات المتحجرة ينجم عنه زيادة صافية في كمية ثاني أكسيد الكربون الموجود.

زجاج البيت الزجاجي لحرارة الشمس (من جميع الأطوال الموجية) بالدخول لكنه لا يسمح لكل الحرارة بالتسرب إلى الخارج. ويجعل تأثير البيت الزجاجي الطبيعي لكوكبنا أن يكون قابلاً للعيش فيه من خلال الحفاظ على درجة الحرارة التي نشأت الحياة بموجبها. وسبب هذا هو ثاني أكسيد الكربون وبقية الغازات الطبيعية في الجو مثل الميثان. وإذا ما استمرت مستويات ثاني أكسيد الكربون على الارتفاع فيخشى على أي حال من احتباس حرارة إضافية وينجم عن ذلك زيادة درجة الحرارة عالمياً.

إن توقع زيادة درجة الحرارة كونياً أمر مقلق. فحتى زيادة لبضع درجات على



الشكل 6-9: دورة الكربون

مقتبسة من Smith (1966)

المعدل يمكن أن تؤدي إلى تأثيرات مناطقية شديدة مثل فترات جفاف طويلة وتلف المحاصيل الزراعية وازدياد التصحر. وقد يذوب الغطاء الثلجي والقطبي جزئياً وهذا بدوره سيؤدي إلى ارتفاع مستوى ماء المحيطات الذي قد يُغرق أجزاءً كبيرة من المناطق الساحلية الواطئة. وعلى مدن مثل نيويورك أن تبني جدراناً لمنع غرقها. أما الدول الساحلية مثل بنغلاديش فقد تغمر*.

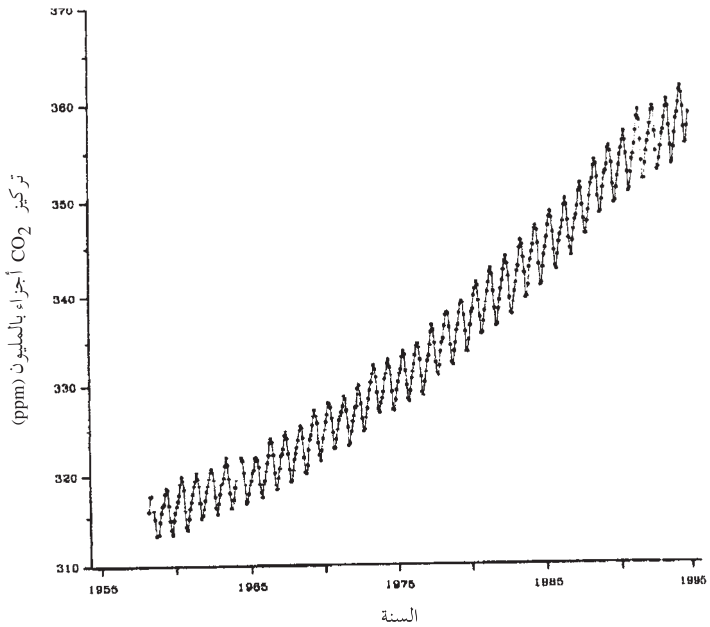
وقد جرى نقاش مطول في الأوساط العلمية في العقد الماضي حول الفرضية التي تضع اللوم على الوقود الأحفوري باعتباره السبب في تغير درجة حرارة الكون التي تهددنا. وقد حصل اتفاق آراء بعد أن كان هناك تباين كبير في ما بينها على وجود زيادة متوقعة تتراوح بين 3 إلى 8 درجات فهرنهايت في معدل حرارة الكون خلال القرن القادم بسبب سخونة البيت الزجاجي إذا لم تتخذ أي إجراءات مخففة وأن تلك هي «حقيقة واقعية». وقد حظي هذا التوقع بدعم عدد من المؤسسات العلمية المهمة بما فيها أكاديمية العلوم الوطنية في الولايات المتحدة ومجموعة العمل الدولية من العلماء التي تشكلت برعاية قمة الأرض التي رعتها الأمم المتحدة والتي أقيمت في ريو دي جانيرو عام 1992. وقد جرى التوقيع خلال قمة الأرض من قبل 136 دولة على الاتفاقية عن التغير المناخي والتي تعهدت بموجبها تثبيت زيادة انبعاثات البيت الزجاجي خلال القرن الحادي والعشرين. وقد جرى تأسيس مجموعات عمل عن التغير المناخي (IPCC) تحت مظلة الهيئة بين الحكومات. وقامت هذه بالتحري عن عدد من الفعاليات الإنسانية المختلفة التي تولد غازات يمكن أن تساهم بالدفء وارتفاع درجة الحرارة التي يسببها تأثير البيت الزجاجي[15]. وتشمل هذه الفعاليات التصنيع الذي ينفث الكلوروفلوروكربونات (CFCs) والزراعة التي تنتج الميثان والتصحر الذي يقلل الإمكانات النباتية لتثبيت الكربون إضافة إلى ابنعاثات CO2 من الوقود المستخدم لتوليد الطاقة. ويعتقد أن الانبعاثات من إنتاج واستهلاك الطاقة تساهم بالقسط الأكبر من تأثيرات البيت الزجاجي.

* إذا ما كانت بنغلاديش دولة ذات مساحة لا بأس بها وقد تغمر جزئياً إلا أن بعض الدول الجزرية في المحيط الهادي وكذلك جزر المالديف ربما تغرق كلياً وتختفي كبلد إذا ما تحقق ذلك وازداد مستوى سطح المحيطات بضعة أمتار.

15 يعطي تقرير IPCC المعنون Climate Change – The IPCC Responses (انظر IPCC في المراجع) بعض الملاحظات والتوصيات. وتركز الإجراءات الموصى بها لتقليل انبعاثات البيت الزجاجي على كفاءة الطاقة (انظر الفصلين 3 و4) في المدى القريب وعلى تحول إلى مصادر طاقة غير الوقود الأحفوري (انظر الفصل 11 والملحق ج) عن المدى البعيد.

وهي تمثل أيضاً أكثر العوائق التي تعترض تخفيف الأثر بسبب الكلفة وتخريب أسلوب الحياة في عالم يعتمد على الوقود الأحفوري إلى هذه الدرجة.

وحتى مع إجماع الآراء العلمية، لا تزال هناك بعض المبهمات عن الاحترار الكوني. فالتوقعات المناخية عن درجة حرارة الكون والرطوبة والعوامل المناخية الأخرى تعتمد على نماذج حاسوبية. هذه النماذج رغم علو مستواها وتعقيدها بحيث تحتاج إلى «الحواسيب الفائقة» ما زالت تتطلب التطوير. والبحوث عن الخلفية مطلوبة أيضاً عن مختلف الآليات الديناميكية في الجو التي يمكن أن تؤثر على مرور الإشعاع الحراري (الحرارة) من سطح الأرض عائداً إلى الفضاء مثل إعادة الإشعاع من الغيوم وبخار الماء من طبقات الجو العليا وخاصيات تشتيت الإشعاع للرذاذ (Aerosol) المتولد من مصادرغير طبيعية. وقد انتقدت المجموعات الصناعية بعض



الشكل 10-6

تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الجو. أجزاء بالمليون من ثاني أكسيد الكربون (ppm).

المصدر The Carbon Dioxide Information Analysis Centre, Oak Ridge National Laboratory.

ملاحظة: جمعت المعلومات من جبل ماونالوا في هاواي من قبل تشارلز كيلنغ من معهد سكريبس في جامعة كاليفورنيا.

التقارير المجمع عليها قائلة إنها تخفف في استنتاجاتها من أثر مبهمات من هذا النوع (انظر: *Science*, June 21, 1996).

ومن النقاط المثيرة للجدل تأثير كميات بخار الماء المتزايدة التي ستحدث إذا ما حصلت زيادات في درجات الحرارة كونياً. ووجهة نظر الأغلبية في المجتمع العلمي هي أن الزيادة في بخار الماء في الجو تؤدي إلى زيادة في قابلية الاحتواء الإشعاعي (للحرارة) رغم وجود بعض المعارضين الذين لا يتفقون مع هذا (*N.Y.Times*, 14 June and 24, 1996). وهذا سؤال مهم لأن بخار الماء المتزايد يصبح له تأثير «التغذية المرتجعة الإيجابية» لظاهرة الاحترار الكوني ذلك إذا ما كان رأي الأغلبية صحيحاً، ما يعني أنه كلما زادت درجة حرارة الكون عزز بخار الماء المتزايد ظاهرة الاحترار الكوني (أي عمل على تضخيم الظاهرة). وإذا ما كان رأي النقاد صحيحاً فسيكون مدى الاحترار أقل بكثير. ولما كانت النماذج الحاسوبية تحتوي على هذه القضية أصبح فهم حقيقة الظاهرة أمراً حاسماً لشرعية هذه الاسقاطات.

لقد سعى العلماء إلى الحصول على فهم أوسع لهذه المشكلة من خلال الأدلة عن ماضي الأرض الجيولوجي. فالإشارات على تبدل درجة الحرارة المحتبسة في الصخور والجليد توفر أدلة على دورات سابقة للاحترار والبرودة الكونية لكن الباحثين لم يكتشفوا حتى الآن أدلة واضحة على الكيفية التي قد يسلكها المناخ في القرن القادم (*Science*, 12 Feb 1993). إضافة إلى ذلك فإن نماذج المناخ المشغلة على الحاسوب المرتدة إلى الماضي ليست قادرة على تكرار السجل التاريخي، ما يضفي نوعاً من الشك على التوقعات بخصوص التغير. كذلك لا يزال هناك الكثير الواجب تعلمه حول التغيرات البيولوجية المصاحبة لتغير تراكيز CO_2 ولدرجة الحرارة المرتفعة. وليس بالإمكان تحديد استجابة المكونات البحرية (الشكل 6-9) وتلك التي تعتاش على اليابسة بقدر من الثقة تجاه زيادة مدخول ثاني أكسيد الكربون من الوقود الأحفوري. فربما يستخدم ثاني أكسيد الكربون ببساطة في المعالجات الطبيعية وقد تبدأ النباتات والمحيطات بامتصاص قدر أكبر من ثاني أكسيد الكربون وبذلك لن يحدث تأثير البيت الزجاجي.

ولأن المعالجات والنتائج لم تفهم كلياً كيف يجب أن يكون رد فعل العالم

لإمكانية حدوث تأثير البيت الزجاجي. تدعي إحدى وجهات النظر بعدم الحاجة إلى فعل أي شيء حتى نتأكد بصورة أوثق مما يحدث، ذلك لأن أي فعل الآن قد لا يعني شيئاً أو قد يكون خاطئاً. من ناحية أخرى نستطيع تقليل حرق الوقود الأحفوري بصورة شديدة، ونسبب من خلال ذلك صعوبات اقتصادية، ثم نكتشف عدم وجود أي زيادة في الاحترار الكوني. أو ربما نكتشف حدوث تغير مداري قد يؤدي فعلاً إلى برودة الكوكب. وكان بعض الباحثين في أمور المناخ يحذرون حتى سبعينيات القرن العشرين من اتجاه الأرض نحو البرودة.

يدعي علماء آخرون كذلك، أننا لا نقدر على المجازفة بمثل هذه التغيرات حيث قد يؤدي عدم اتخاذ أي إجراء إلى أثر مدمر. وعلينا تبعاً لهذا الرأي اتخاذ إجراءات وقائية بصورة عاجلة لأن العمليات والضرر الممكن غير أكيد. وما أن يتأكد تأثير البيت الزجاجي بصورة جازمة حتى تكون الخطوات التصحيحية المتخذة متأخرة وغير ذات جدوى في منع التغيرات المناخية التي يتعذر إلغاؤها لقرن قادم أو أكثر. وقد ينجم عن الإجراءات التصحيحية في أحسن الحالات في تلك الحالة عقود من المعاناة. أما في أسوأ الحالات فقد يواجه العالم مجاعة وقحطاً وربما فوضى اجتماعية أيضاً.

ومع ذلك، فإن نوع الإجراءات الواجب اتخاذها لا يزال غير واضح. فالمنع الكامل لاستخدام الوقود الأحفوري سيساعد، غير أنه يتضمن اضطرابات اقتصادية واسعة لحين العثور على مصادر بديلة. وقد نفكر في إعادة زرع الغابات لأن الأشجار تمتص كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون. غير أن الأمر يتطلب زراعة منطقة تعادل مساحة أستراليا لكي يحدث الفرق وهذا ما يفترض مسبقاً عكس التوجه العالمي المستمر في التصحر[16].

ومن الممكن بالطبع إبطاء استخدام الموارد الأحفورية دون أن يسبب ذلك أي صعوبات اقتصادية كبيرة. غير أن هذا سيعني قدراً أكبر من الحفاظية، كما سيعني استخداماً أكبر للبدائل الخالية من الاحتراق مثل الانشطار النووي لتوليد الكهرباء

16 اقترحت بعض المجموعات البيئية أن تقوم الحكومات والمؤسسات الخاصة بشراء الديون المترتبة على العالم الثالث للبنوك الأجنبية بسعر منخفض. ويجب أن توافق هذه الأقطار مقابل ذلك على الحفاظ على الغابات في أراضيها وبخاصة الغابات المطرية الاستوائية. وغالباً ما تدعى هذه بمبادلات الدين – مقابل – الغابات.

وتطوير موارد جديدة مثل الاندماج النووي والطاقة الشمسية. لكن هذين الاثنين الأخيرين كما سنرى في الفصل الحادي عشر أبعد ما يكونان عن التهيؤ للاستخدام الواسع. وسيبين الفصلان السابع والتاسع أن قدراً متزايداً بصورة ملموسة من قدرة الانشطار النووي يحمل معه أخطاراً وكلفاً من نوع آخر.

ورغم ذلك يبدو أن الخطر الذي يمثله ثاني أكسيد الكربون كبير بدرجة تستدعي التدخل. وقد جرى اتخاذ بعض الإجراءات رغم كونها محدودة. فقد قامت معظم الدول الصناعية بتبني سياسات عامة تدعم إبطاء، وفي النهاية تثبيت انبعاث غازات البيت الزجاجي. في الوقت ذاته كانت المبادرات للتاثير في هذا الاستقرار قليلة. وقد ركزت أكثرها استخداماً على تشجيع الكفاءة في استخدام الطاقة من النوع الذي وصف في الفصل الرابع. والهدف هو تقليل استخدام الوقود الأحفوري (أو تقليل نمو استخدامه على الأقل) من دون عرقلة النمو الاقتصادي. وهذا كما رأينا في الفصل الرابع أمر ممكن تماماً، كما بينت لنا الأحداث في عقد الثمانينيات.

لقد هاجمت بضع دول أوروبية مسألة CO_2 بصورة مباشرة من خلال استخدام الحوافز للتقليل من انبعاث الكربون. وقد اتخذت هذه الحوافز هيئة «ضريبة الكربون» حيث يجري فرض الضرائب على أنواع الوقود تبعاً لمحتواها الكربوني. وكما رأينا في الفصل الرابع الأسعار المرتفعة تقوم فعلاً بإعاقة الاستهلاك. ويجب أن تكون النتيجة في هذه الحالة استخدام أقل للفحم لزيادة نسبة الكربون في بنيته الكيميائية. إن التحول من الفحم إلى وقود آخر مثل الغاز الطبيعي سيقلل في الحقيقة انبعاثات CO_2 بصورة كبيرة ومع ذلك، فإن سعر وحدة الطاقة المتوفرة من الفحم من غير الضريبة أقل بدرجة كبيرة من مثيلتها من الغاز بحيث إن الشركات لا تتحمل التحول، لأن الكلفة الإضافية ستضعها في موقع غير تنافسي. غير أن الضريبة ستسوي الأمر وتجعل التحول قابلاً للتطبيق.

ويجب طبعاً أن تكون الحوافز كبيرة وشاملة بطريقة أعم بالنسبة إلى العالم المتقد لتثبيت الانبعاثات بكمية كبيرة تكون تحت المستويات الحالية. ويجب أن تشمل تحولاً كاملاً من استخدام أنواع الوقود الأحفوري إلى المصادر المتجددة مثل الطاقة الشمسية. أو التوسع في استخدام تقنيات مستخدمة حالياً مثل الطاقة النووية التي لا تولد CO_2 لكن لديها مشاكل بيئية كبيرة (وكذلك الاقتصادية).

وهناك مشكلة أخرى تعيق تبني سياسات أكثر صرامة في ما يتعلق بثاني أكسيد الكربون. فعامة الشعب لا تمتلك إلا إدراكاً محدوداً حول القضية ومصلحة محدودة في الرد على سياسة رئيسة. ولا تبدو أهمية التحول المناخي أمراً فورياً بالنسبة إلى العالم المتطور. وتعطي نسب البطالة التي تتمثل برقمين (أي تتجاوز عشرة في المئة) حتى في دول مثل فرنسا وألمانيا وإيطاليا أهمية أكبر للنمو الاقتصادي مقارنة بالتأثيرات المناخية حتى إذا ما تزايد انبعاث CO_2 في عملية النمو. إن المأزق الذي يواجهه العالم النامي هو إحراز النمو من غير معاناة الكوارث البيئية. إلا أن التكنولوجيات التي قد تساعد في تقليل الانبعاثات مع زيادة النمو ـ مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية – ليست اقتصادية في الوقت الحالي ولا يتوقع أن تكون كذلك في القريب العاجل خصوصاً أن اهتمام السياسيين في دعم بحوثها قد تضاءل.

إضافة إلى ذلك ليست مشكلة الاحتباس الحراري العالمي مقصوراً أثرها في الدول المتطورة فقط. فلا مناص من تزايد الطلب على الطاقة بين الدول النامية، كما لاحظنا في الفصل الخامس، وهو أمر لا مفر منه إذا كان مستوى المعيشة فيها سيرتفع. ولا يمكن إحراز ذلك من غير زيادة انبعاثات CO_2 كونياً وما لم يجرِ تقليل الانبعاثات في الدول المتطورة. وما زال العالم بعيداً جداً عن التوصل إلى سياسة متناغمة فاعلة حول قضية الاحترار الكوني. ويعتقد البعض أننا حين نكون جاهزين للعمل سيكون الزمن قد سبقنا.

الأخلاقيات المتمركزة حول البيئة

إن قضية ثاني أكسيد الكربون مثل التأثيرات الأخرى للوقود الأحفوري تتعلق بالأضرار التي تصيب البيئة. والضرر البيئي يمثل اهتماماً عملياً واهتماماً أخلاقياً. وعلى أي حال يجري التعبير عن المسائل الأخلاقية في معظمها كقضايا تُعنى بحماية الإنسان[17]. إن حماية الناس من أخطار تلوث الماء أو الهواء أو من نتائج تراكم أكسيد الكربون هي حسنة أخلاقية.

17 أعطي الاعتبار في التمهيد لكتابة الميثاق الموطِر عن التغير المناخي برعاية الأمم المتحدة (انظر IPCC في المراجع) للإعلان عن الأمور التالية (من بين عدد من الأمور الأخرى): (أ) بيئة قابلة للحياة كحق إنساني أساسي (ب) حق سكان العالم كي لا يخضعوا إلى التأثيرات المناخية غير الملائمة (ج) «قاعدة للحذر» (مضادة للتوقعات غير الأكيدة للتحولات المناخية).

لكن ماذا عن الهواء والماء والأرض؟ هل تستحق الاعتبار الأخلاقي؟ هل هناك ضرورة أخلاقية عندما يتعلق الأمر بكوكب الأرض كما هو هناك عندما يتعلق ببقية أفراد الجنس البشري؟

ولقد حاول بعض الفلاسفة في السنين القليلة الماضية دعم نظام أخلاقي يشمل الأشياء غير الحية. والأخلاقيات بموجب هذا المنظور يجب أن تعتمد على التركيز الاقتصادي (أو حول الطبيعة) بدل ارتكازها حول الإنسان. والمفهوم الأساسي هو أن البشر جزء من نظام بيئي وليسوا فوقه. وإذا ما عملوا بطريقة متناغمة مع النظام فهم مصيبون أخلاقياً، وإذا ما أفسدوا النظام فهم مخطئون أخلاقياً، أو أن «الشيء يعد صحيحاً عندما ينزع إلى الحفاظ على تكامل واستقرارية وجمالية المجتمع الحيوي (أي النظام البيئي) وهو خطأ عندما ينزع إلى الاتجاه المغاير»، كما يقول أحد المفكرين الرئيسيين في هذه المدرسة (Leopold, 1949). وبعبارة أخرى لا يعتبر تلويث الجو وزيادة مستويات ثاني أكسيد الكربون والتعدين في مناجم مفتوحة ببساطة فعاليات خطيرة على الإنسان وتحتاج إلى نوع من السيطرة وحسب، بل إنها أخلاقياً خطأ لأنها تحدث عنفاً لإيكولوجية العالم.

إن تقبل هذا الرأي يعني تقبل منظور أخلاقي مختلف جداً عمّا كان سائداً بصورة عامة لآلاف السنين. فالبشر قد نظروا إلى أنفسهم تقليدياً كقمة الإبداع في الصنع، واهتم أناس أخرون بالأخلاقيات. لم يكن للأشكال الواطئة للحياة، أقل بكثير من الأشياء غير الحية، موقفاً أخلاقياً ملازماً. وقد اعتبرنا بصورة عامة، أن للبشر حقاً باستخدام العالم كما يشاءون (والحيوانات كذلك إنما إلى درجة أقل) شرط ألا يؤذوا بني البشر الآخرين.

وهناك بالرغم من ذلك سبب يدعونا إلى التساؤل عن وجهة نظر صارمة حول الإنسان. فهل أن «تفوق» أحد الأجناس هو سبب كافٍ يمنحه الأفضلية الأخلاقية؟ إن ذلك سيعني كما أشار إليه أحد الفلاسفة أن قدوم كائنات أكثر تفوقاً من كوكب آخر إلى الأرض سيعطيهم الحق في استخدام البشر كممتلكات يمكن التخلص منها (Wertz, 1988). وهناك في تاريخ الإنسان بالطبع العديد من الأمثلة حيث اعتبرت مجموعة من الناس أنفسها متفوقة وتصرفت تجاه الآخرين بطرق نعتبرها الآن تدعو إلى الاشمئزاز.

ويبدو أيضاً أن المنظور التقليدي المتمركز حول الإنسان يسيء قراءة نظرية التطور. فهو يوحي بأن الجنس البشري هو نهاية عملية التطور في حين لا ترى العلوم البيولوجية نهاية للتطور. وإذا ما حجزنا لأنفسنا في الحقيقة الحق في إرباك نظام العالم البيئي فربما نمنع تطور أنواع أرقى من الحياة.

وقد يتفق البعض مع القول إن الأخلاقيات المتمركزة حول الإنسان ليست متكاملة ويجب أن تشمل أنواع الحياة الأخرى القادرة على الإحساس. وبخاصة الحيوانات الأخرى، لكن الأسلوب المتمركز حول المحيط يحاول أن يبرهن على أن الطبيعة بمجملها متوازنة وأن كل شيء فيها هو جزء من المجتمع. وليس باستطاعة أحد وضع تمييز أخلاقي بين الأعضاء – أكانوا بشراً أم حيوانات أم نباتات أم أنهاراً – لأنهم كلهم يعتمدون على بعضهم البعض تبعاً لهذا الرأي. ولكي نحافظ على حقوق أي منها يجب أن يُنظر إليها جميعاً وحتى الصخور فيها على أنها تمتلك حقوقاً.

ورغم أن الأخلاقيات المتمركزة حول المحيط تبدو جديرة بالتصديق إلا أنها تثير العديد من المشاكل. وأهمها أنها تقترح وجود طريقة محددة يجب أن ننتسب إلى نظام المحيط بموجبها. ومن الصعب في الحقيقة القول ما هو نوع السلوك الصحيح عندما نتفاعل مع الطبيعة. إن حماية الأجناس من الانقراض يبدو أنه واحد من الطرق البديهية للحفاظ على «تكامل» و«استقرارية» الطبيعة. ورغم ذلك، فإن الطبيعة ذاتها تسبب الانقراض. والاستقرارية تبدو في الحقيقة على النقيض لما يحدث في العالم لأن النظام المحيطي ليس إلا ديناميكياً (Schrader – Frechette, in: Repetto, 1985).

وقد اتجهت العلوم في الوقت ذاته إلى دعم الرأي القائل إن حماية البيئة عمل حكيم. إذ يجب علينا محاولة إدامة تنوع الأجناس – إنقاذ الأجناس من الانقراض – لأن التنوع يعظم إمكانية النمو التطوري. (وتوجد الآن في العديد من الدول بعض التشريعات الوقائية). وتخريب الطبيعة بالطبع له مترتبات سلبية واضحة أو مترتبات ليست واضحة إلا أنها ذات إمكانية تدميرية. وهذا الرأي لا يجعل كوكب الأرض بالضرورة ذاته جزءاً من مجتمع أخلاقي. إذ من الممكن النظر إليه على وجه التحديد على أنه ذو أثر مفيد، أي إن من المفيد حماية التنوع في الطبيعة والنظام المحيطي ككل لأننا نعتقد أن نتيجة مثل هذه السياسة ستكون إيجابية (Wenz, 1988). وقد تكون لهذه الصياغة أقل قوة من الضرورة الأخلاقية لكنها تدعو إلى استجابة مشابهة.

وربما نضيف أيضاً أن منظوراً متمركزاً حول الإنسان يمكن أن يصاغ لكي يؤدي إلى نفس نوع نتيجة المنظور المتمركز حول المحيط. فنستطيع مثلاً أن نشجب تدمير البيئة لأنها تنافي معظم أنظمة القيم الإنسانية التي تشجب الجشع أو الطمع. وإذا ما منحنا أيضاً الحق لكافة أناس الحاضر والمستقبل في استخدام كوكب الأرض[18] فسيكون لنا خيار قليل في التصرف بطرق تقوم بصورة عامة على حماية الموارد والمحيط الأساسي للكوكب. إن التصرف بخلاف ذلك يعني التصرف بصورة غير أخلاقية وخاصة بالنسبة إلى الأجيال القادمة. ورغم ذلك فإن مجرد وجود صياغات جديدة متمركزة حول المحيط يوحي بأن منظورنا المتمركز حول الإنسان لم يوفر للعديد من الناس إجراءات وقائية وافية بالنسبة إلى البيئة.

المراجع

Berry, B. J. L. (ed.). *The Social Burdens of Environmental Pollution: a Comparative Metropolitan Data Source*. Cambridge, MA: Ballinger, 1977.

Chapman, D. *Energy Resources and Energy Corporations*. Ithaca, NY: Cornell University Press, 1983.

Dorf, R. C. *Energy Resources and Policy*. Reading, MA:Addison-Wesley, 1978.

Harrison, D. *Who Pays for Clean Air*. Cambridge, MA: Ballinger, 1975.

Haskell, E. H. *The Politics of Clean Air*. New York: Praeger, 1982.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), World Meteorological Organization/United Nations Environment Program

(a) *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. New York: Cambridge University Press, 1990.

(b) *Climate Change - IPCC Responses*. Washington, DC.: Island Press, 1991.

(c) *Climate Change 1992: The IPCC Supplementary Report*. New York: Cambridge University Press, 1992.

International Energy Agency (lEA). *Coal Information 1986*. Paris, France: Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), 1986.

Leopold, A. *A Sand County Almanac*. Oxford: Oxford University Press, 1949.

Murthy, B. N. and A. F. Mann. *Economics of Present and Future Fossil -Based Electric Generations*. New York: Dekker, 1985.

National Academy of Sciences. *Policy Implications of Greenhouse Warming*. Washington,

18 هذا مشتق من نظرية تعود إلى جون لوك فيلسوف القرن السابع عشر الإنجليزي. فقد لاحظ لوك في كتابه *Second Treatise of Civil Government* أن حق الإنسان في استخدام الأرض مشروط بوجوب «ترك المقدار نفسه والنوعية نفسها للاستخدام العام من قبل الآخرين». وقد اقتبس البعض نظريات لوك حول الملكية الخاصة لتبرير استغلالهم لموارد العالم. لكن ما يشير إليه الفيلسوف K.S.Shrader – Frechette أن هذا التفسير لا يترك «نفس المقدار ونفس النوعية» للآخرين . وحتى إذا ما اتبعنا لوك فباستطاعتنا أن نستنتج أن الحماية البيئية مطلوبة من موقف مرتكز على المحيط(Shrader – Frechette, in: Repetto,1985) .

DC: National Academy Press, 1991.

National Academy of Sciences. *The Rehabilitation Potential of Western Coal Lands*. Cambridge, MA: Ballinger, 1974.

«A Skeptic Asks, Is It Getting Hotter, Or Is It Just The Computer Model?» *The New York Times*. Science Times Section, Tuesday, 18 June 1996, and «It Takes A Skeptic to Ignore Global Warming». Letters to the Editor. *The NewYork Times*. Monday, 24 June, 1996.

Partridge, E. (ed.). *Responsibilities to Future Generations - Environmental Ethics*. Buffalo, NY: Prometheus Books, 1981.

Penner, S. S. and L. Icerman. (reprinted 1976). *Energy* - Volume 1- Demands, Resources and Policy. Reading, MA: Addison-Wesley, 1974.

Repetto, R. (ed.). *The Global Possible: Resources, Development, and the New Century*. New Haven:Yale University Press, 1985.

Ridgeway, J. (ed.). *Powering Civilization: The Complete Energy Reader*. New York: Pantheon, 1982.

Rosen, L. and R. Glasser (eds.). 1992. «Climate Change and Energy Policy». *Proceedings of the International Conference on Global Climate Change: Its Mitigation Through Improved Production and Use of Energy,* Los Alamos National Laboratory, 21-24 October 1991, NY. American Institute of Physics, 1992.

Ruster, B. (ed.). International Protection of the Environment.Vol. 28. NY: Dobbs Ferry, Oceana Publishers, 1982.

Science, Special Issue on «Evolution of Atmospheres»: 12 February 1993

(a) «Is the Geological Past a Key to the (Near) Future?». Climate Change news section. pp. 906-908.

(b) «Searching for Clues to Ancient Carbon Dioxide.» Climate Change news section. pp. 908-909.

(c) J. F. Kasting. «Earth's Early Atmosphere.», a research article. pp. 920-926.

(d) D. Raynaud [et al.]. «The Ice Record of Greenhouse Gases.»a research article. pp. 926-934.

(e) E. T. Sundquist. «The Global Carbon Dioxide Budget.» a research article. pp. 934-941.

«Industry Group Assails Climate Chapter.» *Science*. *Global Warming new section:* vol. 272, 21 June 1996. p. 1734. Shrader-Frechette, K. S. *Environmental' Ethics*. Pacific Grove, CA.: Boxwood Press, 1981.

Stobaugh, R. and D. Yergin. Energy Future. New York: Vintage, 1983.

Swartzman, D. (ed.). *Cost-Benefit Analysis and Environmental Regulations, Polities, Ethics and Methods*. Washington, DC: The Conservation Foundation.

Tolley, G. S. (ed.). *Environmental Policy - Elements of Environmental Analysis*.Vol. 1. Cambridge, MA: Ballinger.

Tyner, W. E. and R. J. Kalter. *Western Coal - Promise or Problem. Lexington*, MA: Lexington Books, 1978.

U.S. Department of Energy. *DOE Facts Book*. Washington, DC, 1986.

Wenz, P. S. *Environmental Justice*. Albany, NY: State University of New York Press, 1988.

Wilson, C. L. (project director). Coal- Bridge to the Future. Report of the World Coal (WOCOL) Study. Cambridge, A.:Ballinger, 1980.

Wilson, [et al.]. *Health Effects of Fossil Fuel Burning - Assessment of Mitigation*. Cambridge, MA: Ballinger, 1980.

الفصل السابع

تكنولوجيا الانشطار النووي

المنظور

الوعد

بدا مستقبل الطاقة النووية عام 1953 واعداً مع إطلاق برنامج (الذرة من أجل السلام). غير أن هذه الوعود كانت مختلفة اختلافاً صارخاً عن النتائج الرهيبة للقنبلة الذرية التي جرى تطويرها في نهاية الحرب العالمية الثانية. يمكن للطاقة الذرية التجارية أن تكون وسيلة نظيفة ومتوفرة وغير مكلفة لتوليد الكهرباء حسبما يقول أنصارها. كما ادعى بعض مؤيديها الأوائل بأنها ستكون رخيصة إلى درجة الابتذال.

ومع ذلك لم يتحقق هذا المنظور التفاؤلي. فقد خيمت على الطاقة النووية بدءاً بستينيات القرن العشرين سحابة من الجدل ازدادت شدة في العقود التالية. إضافة إلى ذلك برهنت الطاقة النووية على كونها أكثر كلفة من أن تكون مصدراً بديلاً ورخيصاً للطاقة. وتوقف بناء محطات جديدة في وسط عقد الثمانينيات في الولايات المتحدة مع انعدام أي طلب جديد منذ عام 1987، وجرى إلغاء كثير من الطلبيات الجديدة في دول أخرى أيضاً. وقد عجلت حادثة تشرنوبل (في الاتحاد السوفياتي السابق) عام 1986 هذا التوجه المبتعد عن الطاقة النووية، ما وضع مستقبلها في إطار من الشك.

ملخص تاريخي

كان تطور القدرة الذرية للاستخدمات السلمية بعد التطوير الناجح للقنبلة الذرية في الحرب العالمية الثانية بطيئاً. وكان هم قانون الطاقة الذرية الأغلب لعام 1946 هو تراكم أسلحة أكثر وأفضل من سابقتها، وكان ذلك أيضاً الأسبقية الأولى لوكالة الطاقة الذرية (AEC) التي نُظمت لمتابعة هذه السياسة. وكان المحفز لهذا البرنامج بالطبع ضغوط التطورات السياسية/ العسكرية على المستوى العالمي، لكنه تجاهل في البداية الوعود الوهاجة للطاقة النووية السلمية التي عبّر عنها العلماء المتقدمون والصحافة مع انتهاء الحرب.

ومع بدء عقد الخمسينيات كان الاهتمام بتوليد القوة النووية قد تنامى إلى درجة جعلت الرئيس دوايت أيزنهاور يقر بها في اقتراحاته عن القوة الذرية لأجل السلام التي قدمها إلى الأمم المتحدة عام 1953، وفي قانون الطاقة الذرية الذي شرعه الكونغرس عام 1954. وكان من بين المؤيدين الأقوياء للطاقة النووية د. غلين سيبورك (Glen Seaborg) (وهو كيميائي)، ود. ألفين واينبيرغ (Alvin Weinberg) (وهو فيزيائي)، وهايمان ريكوفر (Hyman Rickover) (وهو ضابط بحري ومهندس). وكانت مفاهيم محددة لمفاعلات القدرة النووية قد اقترحت في ذلك الحين.

ورغم ذلك فإن برامج وكالة الطاقة الذرية في أوائل الخمسينيات لم تُنتج مفاعلات رائدة مصممة خصيصاً لتوليد الطاقة الكهربائية للاستخدام المدني. وقد أدى تطوير مفاعل للاستخدام العسكري إلى إنتاج أول مفاعل تجاري. ويعود الفضل إلى ريكوفر في بناء أول مفاعل صغير يعمل بالماء المغلي (BWR) الذي استخدم كمصدر قوة لغواصة. وكان ريكوفر يترأس مجموعة تصاميم في عمل تصميمي تعاوني بين وكالة الطاقة الذرية وشركة وستنغهاوس للكهرباء التي قامت بإنتاج المفاعل في أوائل عام 1954 للاستخدام من قبل القوة البحرية للولايات المتحدة عام 1954.

وفي عام 1957 طور مفاعل ريادي يستند إلى تصميم ريكوفر البحري. وجرى تنصيب هذا المفاعل الذي يعمل على قاعدة الماء المضغوط (PWR) في مدينة شيبينغ بورت في بنسلفانيا لصالح شركة ديوكين للإنارة، وهي شركة كهربائية خاصة، حيث تم توليد نحو 60 ميغاواط (رفعت بعد ذلك إلى 150 ميغاواط). أما أول تصميم تجاري فعلي، فكان محطة شركة يانكي في روي في ماساشوسيتس وهي من نوع مفاعل الماء المضغوط من تصميم شركة وستنغهاوس الذي جرى نصبه عام 1958* (الشكل 7-1). وجرى بعدئذٍ إنشاء أكثر من عشرين مفاعلاً يعمل بالماء المضغوط خلال الستينيات. كما وأدخل تصميم تجاري لمفاعل يعمل بالماء المغلي (BWR) من قبل شركة جنرال إلكتريك عام

* ما يذكره المؤلف يخص أميركا، أما على مستوى العالم فقد ربط الاتحاد السوفياتي مفاعلاً بقوة 5 ميغاواط شبه تجريبي إلى شبكة توليد الكهرباء منذ عام 1954 في منطقة أوبنينسك. لكن محطة كالدرهول في شمال غرب إنجلترا تعتبر أول محطة توليد للكهرباء على أسس تجارية (رغم أنها استغلت عسكرياً لإنتاج البلوتونيوم أيضاً). وشملت المحطة أربعة مفاعلات قدرة كل منها 50 ميغاواط من نوع ماغنوكس (Magnox) الذي استخدم اليورانيوم الطبيعي كوقود مع الغرافيت كمهدئ (Moderator) وغاز ثاني أكسيد الكربون كمبرد وربطت المحطة إلى شبكة توليد الكهرباء في 27 آب/ أغسطس 1957 وبقيت تعمل حتى عام 2003.

1969 التي تبعت تطوير نوع ريادي دعمته وكالة الطاقة الذرية في مختبر أرغون الوطني. وسرعان ما أصبحت هناك عدة مفاعلات ماء مغلية قيد الاستخدام التجاري.



الشكل 7-1

محطة يانكي للقوة الذرية في روي في ولاية ماساشوسيتس (توقفت عن العمل عام 1992). بإذن من Yankee Atomic Electric Co.

ومما تجب ملاحظته على أي حال أن هذه المفاعلات التجارية المبكّرة كانت مصممة لإنتاج قوة كهربائية متواضعة أي بحدود 100 ميغاواط (كهرباء). (انظر الفصل الثالث). وكانت المفاعلات التالية لها أكثر قوة عدة مرات. أما تلك التي صممت لتبدأ العمل في السبعينيات والثمانينيات فكانت مفاعلات كبيرة الحجم

لمحطات الحمل الأساس (انظر الفصل الثالث) بحدود 1000 ميغاواط (كهرباء). إن أهمية محطة توليد نووية مفردة لا تقتصر على مقدار الحمل الكهربائي الذي توفِّره – وتكفي 1000 ميغاواط (كهربائي) كقوة مولدة لنحو مليون منزل – إنما، وكما سنرى أيضاً، على ما يمكن أن تسببه من حوادث.

وهناك عند كتابة هذه السطور أكثر من مئة منشأة توليد كهرباء نووية (معظمها دون سعة 1000 ميغاواط كهرباء) عاملة في الولايات المتحدة، وأكثر من 250 في بقية أنحاء العالم يبلغ مجمل قدرتها نحو 250000 ميغاواط (كهرباء). وهناك ما سعته 50000 ميغاواط (كهرباء) إضافية على مستوى العالم في طور البناء أو مخطط لبنائها وذلك عام 1994. غير أن التوقعات المتدنية في تقدير الحاجة إلى الكهرباء وارتفاع كلف البناء، أدى إلى إلغاء خمسة عشر طلباً لبناء محطات في الولايات المتحدة وفي بقية أنحاء العالم. ويجهز التوليد بالطاقة النووية نحو 15 في المئة من مجمل الطاقة الكهربائية المولدة في الولايات المتحدة* و19 في المئة على مستوى العالم حالياً. وما يجب تذكره أن التوليد الكهربائي لا يمثل إلا نسبة محدودة (نحو 28 في المئة في الولايات المتحدة) من مجمل استخدام الطاقة في الاقتصاد، وأن السعة النووية لا يمكنها التأثير إلا في القطاع الكهربائي من الاستخدام الشامل للطاقة (انظر الفصل الرابع، الجدول 4-7).

الأساس الفيزيائي

يتعلق الانشطار النووي بتفاعل النوى الثقيلة المرتبة في نهاية الجدول الدوري. ويجري فلق هذه النوى في عملية الانشطار إلى أجزاء نووية أخف، وتُطلق خلالها كمية من الطاقة. تستخدم المفاعلات النووية الحالية نظير اليورانيوم U^{235} القابل للشطر وهو عنصر موجود في الطبيعة كتراكيز قليلة (أقل من 1 في المئة) في خام اليورانيوم البِكر.

والعنصر الآخر المستخدم هو البلوتونيوم (P^{239})، وهو عنصر من صنع الإنسان. وينتج عن طريق قذف النظير U^{238}، وهو المكون الرئيس لخام اليورانيوم الطبيعي، بالنيوترونات داخل المفاعل. وتؤدي التفاعلات (غير الانشطارية) الناتجة إلى توليد

* تتصدر فرنسا بقية دول العالم في استخدام الطاقة النووية لتوليد الكهرباء إذ تجهز بهذه الطريقة 76 في المئة من احتياجاتها الكهربائية وفيها 59 محطة كهربائية نووية. المصدر:

HYPERLINK «http://www.nea.fr/htm/general/facts.htm/» www. nea. fr/htm /general /facts. htm/.

(Breeding) أو تحويل (Conversion) ^{238}U إلى بلوتونيوم ^{239}P. ويمكن أن يكون الثوريوم، وهو عنصر موجود في الطبيعة مثل اليورانيوم وبكميات مماثلة تقريباً، عنصراً خصباً لهذه التفاعلات التوليدية.

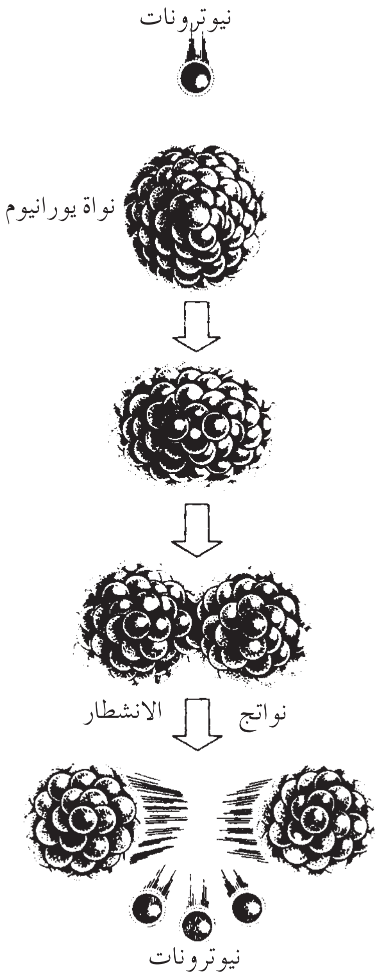
الانشطار النووي

تنفلق العناصر القابلة للانشطار (مثل ^{235}U) في قضبان الوقود في المفاعلات النووية التجارية عندما يصطدم نيوترون مع إحدى أنويتها حيث يجري امتصاصها كما يمثله الشكل رقم 7-2. ويصف الشكل عملية الانشطار خطوة خطوة، منتهياً بانشطار نوى اليورانيوم إلى عناصر أخف (تدعى نواتج الانشطار) ونيوترونات. وكل ذلك يصاحبه إطلاق طاقة. والطاقة المطلقة خلال الانشطار هي بالطبع مظهر واضح لمعادلة الفيزياء النووية المشهورة عن الكتلة والطاقة. فمجموع كتل نواتج الانشطار أقل من مجموع كتلة اليورانيوم ^{235}U الأصلي والنيوترونات الناشئة عن الانشطار. ويتمثل الفرق في الكتلة النووية بهيئة طاقة حركية ويجري تحويل هذه الطاقة إلى حرارة ذات فائدة في المفاعل.

التفاعلات التسلسلية

لن تكون الطاقة التي تطلق من تفاعل انشطاري مفرد ذات أهمية عملية لأن مقدارها ضئيل جداً وتقل عن 10–15 كيلوواط – ساعة (بالنسبة إلى كيلوواط – ساعة انظر الملحق أ، الملاحظة 6) مما يكافؤها من الطاقة الكهربائية. لكن نتائج الانشطار النووي ذات أهمية بسبب إمكانية حدوث تفاعل تسلسلي (Chain Reaction). تتحرك النيوترونات المتحررة من خلال الانشطار في التفاعل التسلسلي من نواة واحدة لتسبب انشطارات أخرى. وقد تتضاعف عمليات الانشطار لأن كل تفاعل انشطاري يطلق أكثر من نيوترون واحد (كما يمثله الشكل 7-3). وتولد الاصطدامات المتتالية والتفاعلات الانشطارية تفاعلاً تسلسلياً يديم ذاته (أو يتنامى باستمرار) إذا كانت كثافة مادة الوقود الانشطاري وكتلته الكلية كبيرة كفاية. وحجم المادة الانشطارية التي تتحمل تفاعلاً تسلسلياً تسمى الكتلة الحرجة (Critical Mass).

والتفاعل التسلسلي موجود في قلب كل من القنبلة الذرية والمفاعل النووي الانشطاري إنما توجد بضع خواص مميزة تحدد ما إذا كانت المادة الانشطارية قنبلة أو مجرد مفاعل. وأهم شيء هو سرعة التفاعل التسلسلي الخاضعة للتحكم في

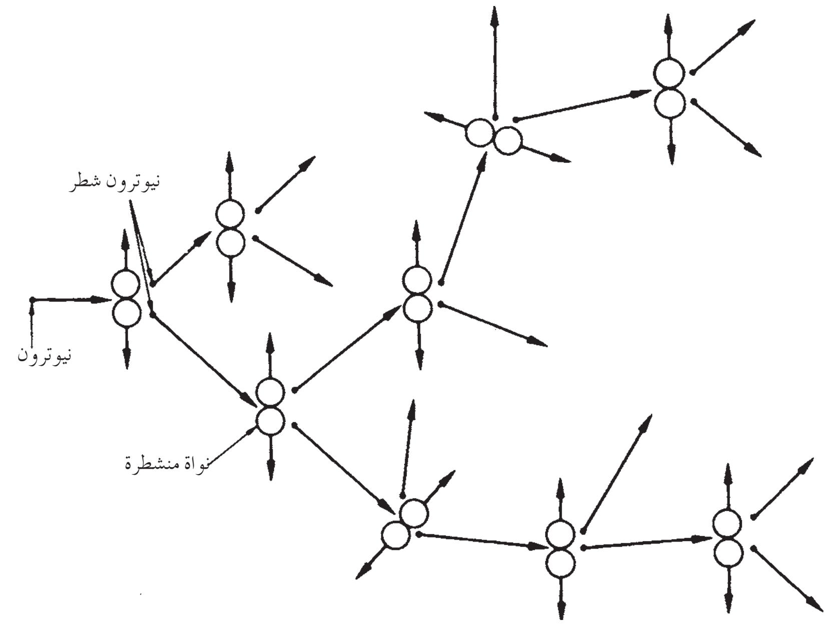


الشكل 7-2:
شكل تخطيطي لعملية الانشطار

نرى هنا تتابع من أربع مراحل يبدو فيه النيوترون أولاً متجهاً إلى الاصطدام بنواة يورانيوم. بعد ذلك يصطدم ويجري امتصاصه في نواة اليورانيوم. ونرى النواة منتفخة في جوانبها ويعني ذلك أنها غير مستقرة ومهيأة لتنفلق. في الحالة الثالثة نرى بداية الفلق أو الانشطار – إلى شظايا تدعى نواتج الانشطار. وتشمل هذه المواد نوى عناصر أخف مثل الباريوم B^{141} والكريبيتون K_r^{92} والنيوترونات. بعد ذلك تتطاير نواتج الانشطار متفرقة نتيجة إطلاق الطاقة خلال عملية الانشطار النووي

Collier and Hewitt (1987). Copyright© 1987, Hemisphere Publishing Corporation.

المفاعل. فتدفق النيوترونات محدد بواسطة قضبان تحكّم مصنوعة من مادة تمتص النيوترونات مثل الكادميوم. ويجري وضع قضبان التحكم هذه بين قضبان الوقود (انظر الشكل 7-4) فتقوم بامتصاص النيوترونات المنطلقة وبذلك تمنع النيوترونات من إحداث تفاعلات انشطارية أخرى. ويمكن لقضبان التحكم هذه، كما سنرى، أن تولج أو تُسحب من قلب المفاعل. وهكذا يمكن التحكم بوتيرة التفاعلات التسلسلية أو حتى غلقها كلياً. أما القنبلة الانشطارية فتجمع، على عكس ذلك، كتلة حرجة تقوم بإطلاق طاقتها، ولا وجود لأي تحكم خارجي ممكن لنسبة تفاعلها.



الشكل 7-3
منظر تشبيهي لتفاعلات انشطار تسلسلية.

المصدر: J. R. Lamarsh, Introduction to Nuclear Engineering ©1983. Addison – Wesley Reading Mass. Publishing Co. Inc.

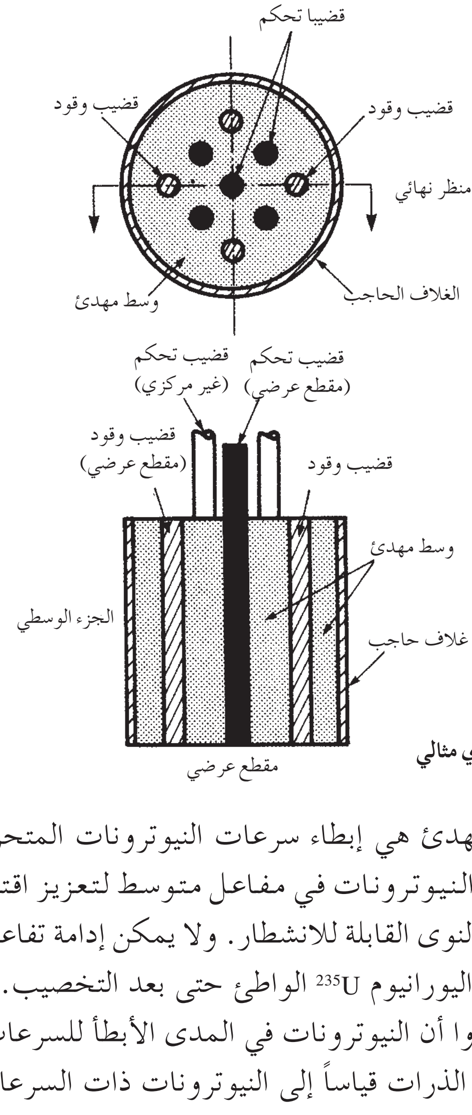
والميزة المهمة لكافة التفاعلات النووية التسلسلية هي تركيز العنصر القابل للانشطار، لأن ذلك يحدد احتمالية ارتطام النيوترون المتحرك بنواة قابلة للانشطار. ويجب، بالنسبة إلى تكنولوجيا القدرة النووية الحالية في الولايات المتحدة، تخصيب عنصر الوقود أي اليورانيوم ^{235}U القابل للانشطار إلى تركيز يبلغ نحو 3 في المئة لتبلغ كمية الذرات القابلة للانشطار حداً كافياً لإدامة التفاعل التسلسلي[1].

الوسط المهدئ

يحوي وعاء احتواء المفاعل في وقتنا الحاضر قلب المفاعل، الذي يحصل التفاعل التسلسلي داخله، وما يستوجب إدراكه أن التفاعل التسلسلي يحصل في مجمل القلب من قضيب وقود إلى قضيب آخر. لذا فإن قضبان الوقود بمجموعها تحدد كتلة

1 ـ كانت مستويات أعلى من التخصيب مطلوبة – نحو 10 في المئة – قبل إمكانية صنع قنبلة ذرية عام 1945. وما زالت عملية التخصيب عائقاً أمام الأقطار التي تبغي تطوير أسلحة ذرية.

المفاعل الحرجة وليس أي قضيب وقود بمفرده. ويملأ المجال بين القضبان في معظم المفاعلات الحالية بوسط مهدئ وهو ببساطة الماء في حالة مفاعلات الولايات المتحدة. ويملأ الوسط المهدئ في مفاعل نموذجي معظم الحيز المتاح بين قضبان الوقود (انظر المفاعل المثالي المبين في الشكل 7-4).



الشكل 7-4: مفاعل نووي مثالي

ومهمة الوسط المهدئ هي إبطاء سرعات النيوترونات المتحررة من الانشطار. إنها ضرورية لإبطاء النيوترونات في مفاعل متوسط لتعزيز اقتناصها (ارتطامها وامتصاصها) من قبل النوى القابلة للانشطار. ولا يمكن إدامة تفاعل تسلسلي من غير مهدىء وذلك لكثافة اليورانيوم ^{235}U الواطئ حتى بعد التخصيب. غير أن الفيزيائيين النوويين الأوائل وجدوا أن النيوترونات في المدى الأبطأ للسرعات الحرارية تمتلك فرصة أفضل لاقتناص الذرات قياساً إلى النيوترونات ذات السرعات العالية. وبذلك يمكن إدامة التفاعل التسلسلي.

وينجز هذا في وسط مهدئ مثل الماء من خلال اصطدامات متعددة (معدل 35

اصطداماً تقريباً) للنيوترونات مع النوى الخفيفة مثل الهيدروجين. وينطلق النيوترون في هذه العملية بسرعة عالية عند تحرره من تفاعل الانشطار النووي لكنه يتباطأ بعد بضعة اصطدامات إلى سرعات الحركة الحرارية[2] (Thermal motion) في الوسط. وهذه النيوترونات البطيئة الحركة تدعى النيوترونات الحرارية، وغالباً ما تدعى المفاعلات التي تستخدم المهدئات بالمفاعلات الحرارية. يحوي الوسط المهدئ الجيد ذرات ذات نوى صغيرة بحيث لا يسبب أي اصطدام لنيوترون مع ذرة سوى فقدان جزئي لسرعة النيوترون. إضافة إلى ذلك ينبغي ألا يحوي الوسط نوى تمتص النيوترونات عند اصطدامها بها ما يسبب فقداناً في استمرارية التفاعل التسلسلي. والمهدئ الجيد الآخر بجانب الماء العادي (H_2O) هو الماء الثقيل (D_2O أو الماء الديوتيري) الذي يمتص عدداً أقل من النيوترونات مقارنة بالماء العادي، ويستخدم في المفاعلات الكندية (ويدعى مفاعل الديوتيريوم ـ اليورانيوم الكندي CANDU). وقد استخدم الغرافيت أيضاً كمهدئ. وكان في الحقيقة المهدئ المستخدم في أول الأكداس الذرية وما زال يستخدم وسطاً في مفاعلات التحويل المستخدمة في الولايات المتحدة لإنتاج المواد الحربية (انظر الفصل الثامن). ويوجد في الاتحاد السوفياتي [سابقاً] وبريطانيا عدد قليل من مفاعلات إنتاج الكهرباء التي تستخدم الغرافيت كمهدئ. والغرافيت في الحقيقة هو أفضل مهدئ، لكن له من الخواص غير المواتية ما يعوق استخدامه في المفاعلات التجارية. ومن هذه الخواص الحرجة قابليته للاحتراق، وقد ظهرت نتائج هذه الخاصية، كما سنرى، بصورة جلية في مفاعل تشرنوبل المهدىء بالغرافيت في الاتحاد السوفياتي.

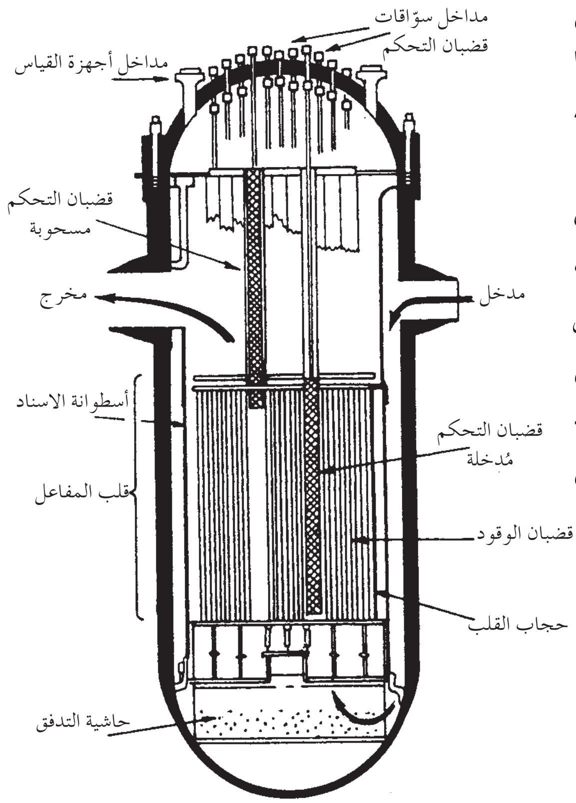
إزالة الحرارة

لاحظنا في وصفنا لعملية الانشطار أن الأمر لا يقتصر على تطاير شظايا الانشطار وحسب، إذ إن هناك طاقة متحررة أيضاً. وتأخذ الشظايا النووية نحو 85 في المئة من

2 ـ إن سرع الحركة الحرارية في وسط ما هي السُرَع المتوقعة لجسيمة في الوسط في درجة حرارية محددة عندما تتحرك عشوائياً من اصطدام إلى الذي يليه. وعندما يتحرك نيوترون خلال وسط مهدئ فإن معظم الاصطدامات هي مع نوع المهدئ مثل نوى الكربون في مفاعل مهدي بالغرافيت. ويبدأ نيوترون الانشطار بسرعة تبلغ نحو نصف سرعة الضوء عندما يدخل الوسط المهدئ باتجاه معين. وسرعان ما يعاني عدة اصطدامات بنوى المهدئ وينحرف اتجاهه كما تقل سرعته بعد كل اصطدام. وبعد بضعة اصطدامات تصبح سرعة النيوترون ضمن المدى الحراري وهو يقل بعامل يبلغ 105 عن سرعته الأصلية أو أقل من ذلك. وعند تلك السرع الحرارية تتحرك النيوترونات مثل بقية الجسيمات الأخرى في الوسط عشوائياً من اصطدام إلى آخر بسرع تتراوح حول معدل السرعة الحرارية لجسيمة عند درجة حرارة معينة: (Collier and Hewlett, 1987, and Lamarsh, 1983).

الطاقة المتحررة، لكنها سرعان ما ترتطم مع ذرات أخرى ضمن قضيب الوقود قبل أن تتسرب إلى المحيط المهدئ، (في حين أن النيوترونات تهرب إلى المهدئ في الأغلب). وعندما تصطدم هذه الشظايا النووية ضمن قضيب الوقود تفقد طاقتها الحركية بشكل حرارة وبذلك يسخن القضيب.

هذا ويجب إزالة حرارة الانشطار من قضيب الوقود لتبريده وللقيام باستخدام الحرارة. وتتحقق عملية انتقال الحرارة هذه في المفاعلات النووية من خلال تدوير مادة مبردة (Coolant) عبر قضبان الوقود. والمادة المستخدمة في مفاعلات الماء الخفيف (LWR) العاملة في الولايات المتحدة ـ بنوعيها BWR وPWR هي الماء نفسه والمستخدم كمادة مهدئة أيضاً. ويستخدم الماء الثقيل الذي يعمل كمهدئ في المفاعلات الكندية كمبرد أيضاً. في حين تستخدم بعض المفاعلات في دول أخرى مثل بريطانيا مواد أخرى غازية للتبريد مثل ثاني أكسيد الكربون.



الشكل 7-5

منظر لمقطع طولي في وعاء احتواء لمفاعل ماء مضغوط. طول وعاء الاحتواء يبلغ أكثر من 40 قدماً وقطره الداخلي نحو 14 قدماً، وسماكة الجدار يزيد على 8 إنش. وتحوي قضبان الوقود في المفاعل أكثر من 100 طن من أكسيد اليورانيوم. أعيد إخراجها. من: The Nuclear Fuel Cycle, The Union of Concerned Scientists, The MIT.

ويبين الشكل 7-5 مقطعاً مبسطاً لتدفق المبرِّد في وعاء احتواء مفاعل وتظهر فيه مداخل ومخارج تدفق المبرد. علينا أن نتصور التدفق كحركة عمودية توازي قضبان الوقود.

نجد أن الحرارة في مفاعلات الولايات المتحدة وكندا تنتقل إلى الماء المبرّد وتقوم بتسخينه مثلما يحدث في مرجل تقليدي. وقد قيل إن المفاعل النووي في حقيقة الأمر ليس إلا طريقة شديدة الغرابة لغلي الماء. وهناك طريقتان بديلتان يمكن بواسطتهما استخدام الماء المغلي من المفاعل في محطة توليد كهرباء. فيمكن لماء التبريد نفسه أن يدور كبخار خلال التوربين في حالة مفاعل الماء المغلي (BWR) كما يبينه الشكل 7-6. ويمكن لسائل التبريد بدل ذلك أن يدور خلال مبادلة حرارية منفصلة يولّد فيها البخار المستخدم لتدوير التوربين. إن فوائد هذه الخطة (الشكل 7-7) هي:

1- إن التوربين معزول عن المفاعل لذا تقل إمكانية تلوثه إشعاعياً.

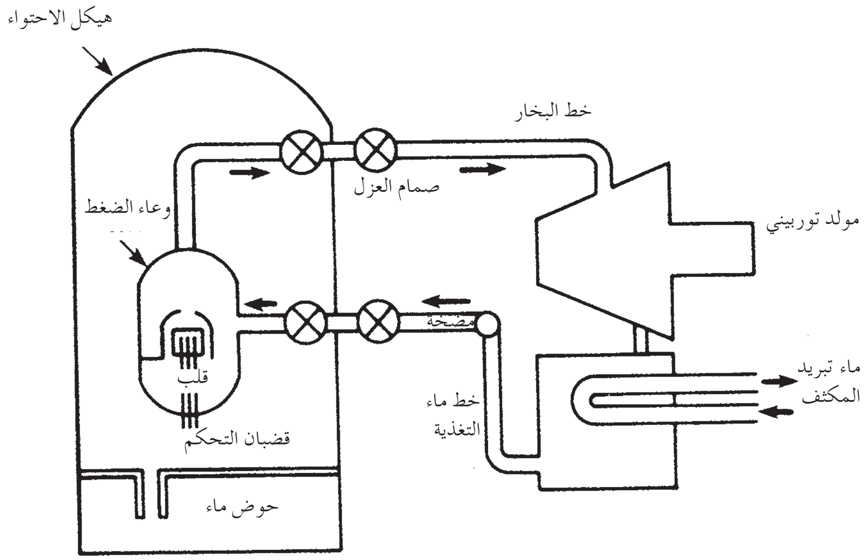
2- يمكن تشغيل المفاعل تحت ضغوط ودرجات حرارة أعلى (انظر الفصل الثالث والملحق أ).

ويمتلك مفاعل الماء المضغوط (PWR) كفاءة حرارية أعلى من مفاعل الماء المغلي (BWR) لأن درجة حرارة مائع الشغل أعلى في البدء (انظر الملحق أ).

التكنولوجيا

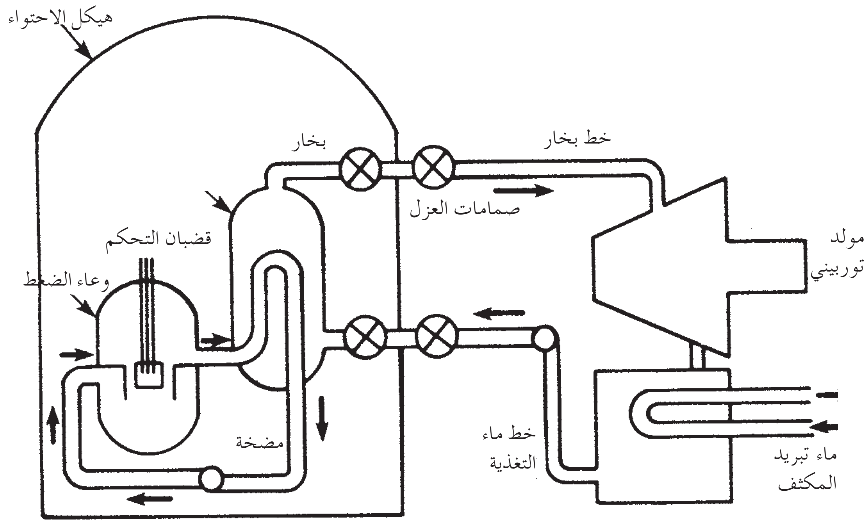
قلب المفاعل

إن قلب المفاعل العامل أكثر تعقيداً ممّا يبيّنه الشكل 7-4. فهو ليس مجرد مجموعة واحدة من القضبان وإنما يضم عدداً من تجميعات الوقود تمتلك كل منها مجموعة من قضبان الوقود وقضبان تحكم. ويبيّن مقطع عرضي لقلب مفاعل نموذجي من مفاعلات الماء المضغوط في (الشكل 7-8) المسافات المتاحة لكل مجمعة، ويوجد مئات منها عادة. ويبيّن الجزء المدغم في القسم (ب) من الشكل7-8 مقطعاً عرضياً مكبّراً لأربع مجمعات وقود مع مجموعة من قضبان التحكم موزعة خلال كل تجميعة.



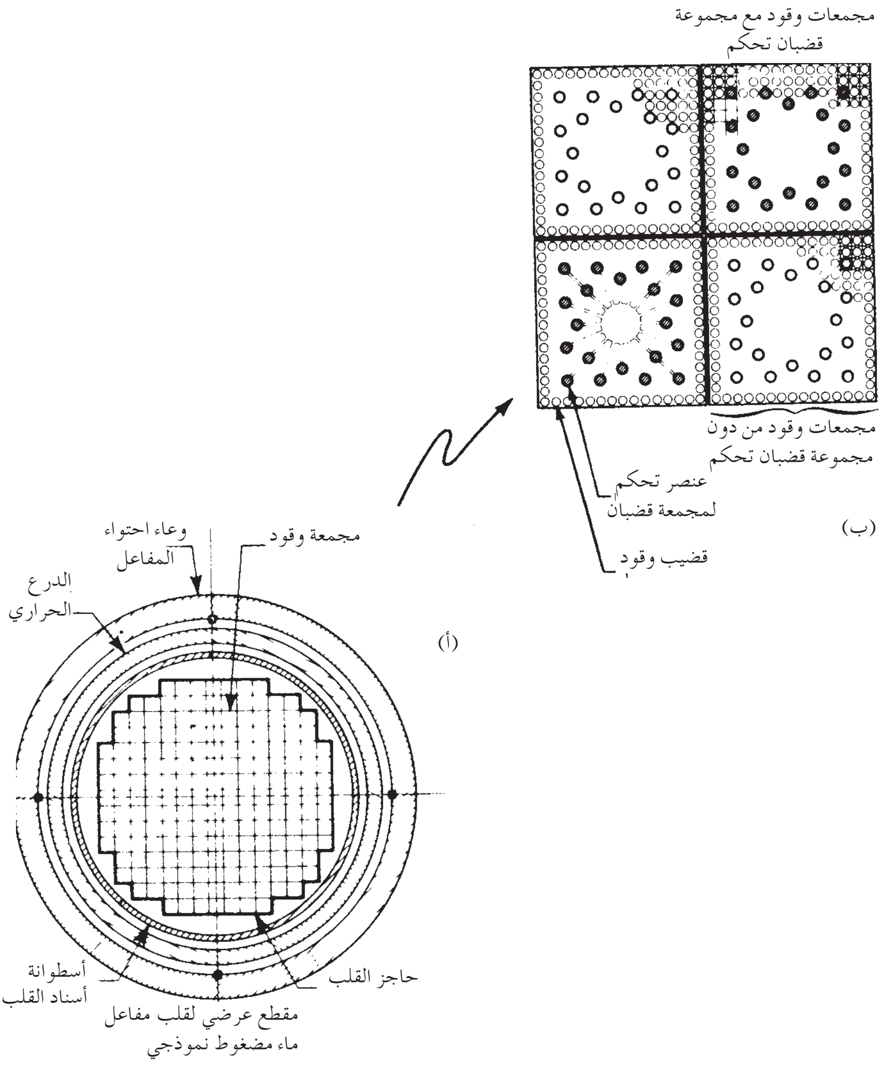
الشكل 7-6: مفاعل الماء المغلي (BWR) شكل تخطيطي

المصدر: Energy Technologies and the Environment, June 1981. U.S. Dept of Energy, Report No. DOE/EP0026. Availabe from National Technical Information Service, Springfield, VA 22161.



الشكل 7-7: مفاعل الماء المضغوط(PWR) ـ شكل تخطيطي.

المصدر: Energy Technologies and the Environment June 1981, U.S. Department of Energy, Report No, DOE/EPOO26. Available from National Technical Information Service, Springfield, VA22161.

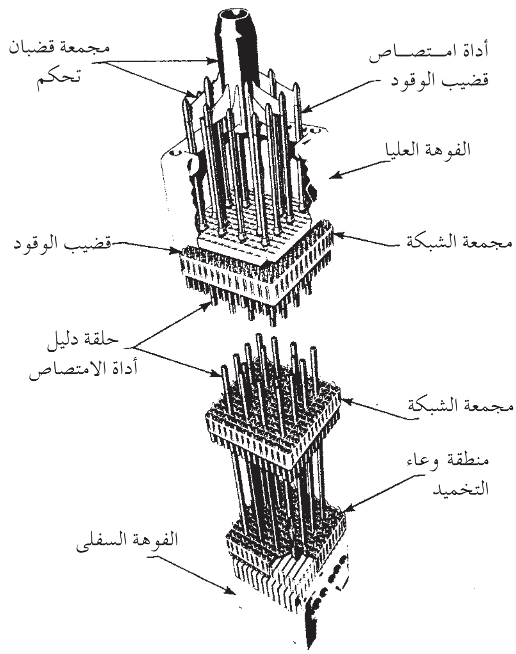


الشكل 7-8: مقطع عرضي لقلب مفاعل نموذجي (أ) ومجمع وقود (ب).

بإذن من .Westinghouse Electric Corp

والشكل 7-8 مقطع مكبر لمنظر جانبي لتجميعة وقود مفردة تحوي تجميعة قضبان تحكم. ويمكن تحميل أو سحب كل تجميعة وقود بمفردها من قلب المفاعل حسبما تتطلب عمليات إعادة تحميل الوقود. ويمكن إدخال أو سحب قضبان التحكم خلال عمليات التحكم في مجموعة لكل تجميعة وقود. وكل مجموعة لإحدى التجميعات مرتبطة إلى هيكل تجميعة قضيب تحكم (الشكل 7-9) وتنزلق القضبان بانسجام وكل

واحد في مزلق أنبوبي منفصل. وكما لاحظنا فإن الماء يتدفق في المجالات بين وداخل تجميعات قضبان التحكم وقضبان الوقود.



الشكل 7-9: عنصر وقود لمفاعل الماء المضغوط

بإذن من Westinghouse Electric Co.

وإذا ما اعتمدنا هذا التصميم في تفكيرنا فسنتمكن من تصوّر العمليات التي تجري بطريقة أفضل:

1 ـ ينتج من تفاعلات الانشطار في قضيب الوقود نيوترونات شديدة الطاقة وشظايا الانشطار (نوى) التي تقذف بعيداً عن موقع التفاعل. وتنطلق أغلبية النيوترونات عالية الطاقة خارج قضيب الوقود وتتغلغل في الوسط المهدئ. أما شظايا الانشطار فترتطم بسرعة بنوى أخرى في نفس قضيب الوقود وتتخلى عن طاقتها بشكل حرارة.

2 ـ تعاني النيوترونات المتحررة الانشطار والتي اخترقت وسط التهدئة من اصطدامات متعددة بنوى الهيدروجين وترتد بصورة مرنة كل مرة فاقدة جزءاً

صغيراً من طاقتها الحركية. ويعمل مفعول التهدئة للماء على إبطاء النيوترونات بحيث يصبح اقتناصها من قبل نواة أخرى قابلة للانشطار من نوع ^{235}U أكثر احتمالاً.

3 ـ بدل ذلك قد تصادف بعض النيوترونات المتحررة في مسارها العشوائي في الماء بين القضبان قضيب تحكم يقوم بامتصاصها. ولا ينتج من ذلك تفاعل انشطاري آخر.

4 ـ يقوم الماء المتدفق عبر المسافات بين القضبان بدل ذلك بمهة التبريد حاملاً معه الحرارة المولدة في قضبان الوقود من شظايا الانشطار.

تفاعلات المفاعل النووي

هذه هي العمليات الأساسية التي تجري ضمن مفاعل نووي لتوليد القدرة. ولكي نعرف كيف يعمل المفاعل علينا أن ندرس وجه آخر: السلوك الديناميكي المرتبط بالزمن لتفاعلات الانشطار. هذا السلوك مع مميزات إنتاج وحركة النيوترونات يدعى «علم حركة المفاعل النووي».

ولفهم الطاقة الحركية للمفاعل، علينا إدراك توازن النيوترونات عبر الزمن في تفاعل تسلسلي. فعدد التفاعلات الانشطارية في فترة زمنية محددة يعتمد مباشرة على عدد النيوترونات المتحركة خلال كل واحد من قضبان الوقود ـ أي النيوترونات المتوافرة للاقتناص من قبل النوى الانشطارية. وهذه النيوترونات بالطبع كانت قبل ذلك قد تحررت بواسطة تفاعلات انشطارية من قضبان وقود أخرى، عادة. وتوجد إمكانية تفاعلات تسلسلية تديم ذاتها بسبب تحرر ما معدله 2.5 نيوترون لكل تفاعل انشطاري. وهناك احتمال لتوسع التفاعل الانشطاري أو بقائه عند وتيرة ثابتة لعدد الانشطارات في وحدة الزمن. والمسألة بالنسبة إلى الهندسة النووية عند بناء محطة قدرة نووية هي التأكد من أن التفاعلات فيها تديم ذاتها، أو أنها (حرجة) من دون توسعها لتصبح خارج نطاق السيطرة في المدى (ما فوق الخطر). ومفتاح تلك المسألة يقع في توازن النيوترونات المتوافرة للانشطار في فترة زمنية محددة. وإذا ما كان العدد يساوي ذلك الموجود في الفترة السابقة، فإن المفاعل سيبقى في الحالة

الحرجة، أما إذا زاد عددها فسيتحرك المفاعل إلى المدى (فوق الخطر).

إن عدد النيوترونات في أي فترة زمنية يمثل النيوترونات التي أنتجتها عملية الانشطار في الفترة الزمنية السابقة والنيوترونات التي فقدت نتيجة عمليات غير انشطارية (مثل تلك التي تقتنصها نوى ^{238}U مثلاً) والنيوترونات التي جرى امتصاصها في قضبان التحكم، والنيوترونات المفقودة عند حافات المفاعل. وهناك أخيراً مجموعة أخرى من النيوترونات وهي ذات تأثير حاسم في التفاعل التسلسلي (مثلما هي مهمة لفهم العمليات النووية) وتدعى بالنيوترونات المتأخرة.

ولا تنبعث هذه النيوترونات من انشطار ^{235}U بل من تحلل نوى غير مستقرة لنواتج الانشطار مثل البروم واليود المشعين التي تتكون هي ذاتها من الانشطار المسبق لنوى U^{235}. وهذه النيوترونات المتأخرة تتميز من النيوترونات الفورية التي تتكون فور حدوث أي عملية انشطار، وتتراوح فترة تأخرها بين نحو ثانية واحدة ودقيقة واحدة.

وينتج الانشطار في المفاعلات العادية التي تستخدم الماء الخفيف بصورة أساسية من اقتناص النيوترونات المهدئة التي جرى إبطاء سرعتها خلال مادة الوسط الموجودة بين قضبان الوقود. ومعدل عمر النيوترون في وسط التهدئة هي 10^{-4} ثانية تقريباً. وهي تخدم كعامل تأخير بسيط في توليد المجموعة التالية من تفاعلات الانشطار في سلسلة التفاعل. ولما كان هذا التأخير على أي حال لا يتجاوز جزءاً بسيطاً من الثانية فإن عدد مرات التوليد في الثانية يمكن أن يكون كبيراً (بضعة آلاف في الحقيقة). وسيتسارع التفاعل التسلسلي في مثل هذه الحالة بصورة فجائية وسيكون من الصعوبة مراقبة المفاعل والسيطرة عليه.

لكن النيوترونات المتأخرة ستعمل بهيئة (دعاة السلام) للحفاظ على المفاعل من الانتقال إلى المرحلة فوق الحرجة. ويشكل التصميم الهندسي توازناً دقيقاً بين النيوترونات الفورية والمتأخرة في النظام من خلال الحفاظ على فيض من النيوترونات الفورية تحت الكثافة الذرية المطلوبة للوصول إلى الحالة الحرجة. غير أن النيوترونات المتأخرة تتيح للمفاعل الوصول إلى الحالة الحرجة. لذا فإن النيوترونات المتأخرة تحدد في معظم الأحوال وتيرة تعاظم التفاعل عند سحب قضبان التحكم أو وتيرة تضاؤل التفاعل عند إيلاج القضبان. وتحدد فترة التأخير الزمنية الطويلة (14 ثانية

لانشطار ^{235}U) معدل التفاعلات التي تجري داخل المفاعل.

إن نتيجة فترات التأخير الطويلة هذه وتيرة بطيئة جداً لتسارع تفاعلات الانشطار من تلك التي تنجم عن تفاعل النيوترونات الفورية وحدَها. فمفاعل الماء الخفيف يحتاج إلى بضع دقائق لينتقل من المستويات الواطئة إلى المستويات العالية للتفاعلات التسلسلية (ولتوليد القدرة). ويستطيع مشغل مفاعل الماء الخفيف، مع مثل هذه الديناميكيات أن يراقب تعاظم التفاعلات ويتخطى (يدوياً) التحكم الأوتوماتيكي (إذا ما كان ذلك ضرورياً)، ويقلل من المستوى الحرج (أي الانتقال إلى المرحلة فوق الحرجة). ومن المناسب أن ندرك أن إينريكو فيرمي (Enrico Fermi)، وهو أحد رواد الفيزياء النووية الحديثة، لاحظ مرة أن عدم وجود نيوترونات متأخرة يعني عدم وجود قدرة نووية (Segre, 1965).

وهناك مع ذلك إمكانية إفساد التوازن الدقيق بين النيوترونات الفورية والنيوترونات المتأخرة، تحت بعض الظروف في المفاعل. وهذا هو السبب الذي غالباً ما يقدم للحادث العنيف الذي حصل في مفاعل تشرنوبل. فالبعض يحاول أن يبرهن أن المفاعل دخل مرحلة (خطورة فورية) وأن التطور نحو ما فوق الخطورة كان قد تحدد من قبل النيوترونات الفورية حصرياً. وقد قيل إن المفاعل ارتفع من مستوى حراري لا يمثل إلا جزءاً من قيمته المقدرة إلى ما يربو على مئة مرة لتلك المقدرة في أربع ثوان.

وما يجب ملاحظته هو إمكانية بناء مفاعل لإنتاج الطاقة الكهربائية مصمم للعمل بواسطة نيوترونات غير مهدئة. ومفاعلات التوليد (Breeder Reactors)، كما سنرى في الفصل التالي، ليست إلا أحد تلك الأمثلة ذلك. فقضبان الوقود فيها حُشِدَت بصورة أكثر كثافة مما هي عليه في مفاعلات الماء الخفيف. وبذلك تزداد فرص اقتناص النيوترونات بعد الانشطار وهي ما زالت في سرعات عالية. ومع ذلك فإن ما يحدد وتيرة المفاعل السريع هي أقلية من النيوترونات المتأخرة. ويجري التحكم بأوقات التأخير الطويلة لهذه النيوترونات بواسطة إبطاء التغيرات في التفاعل المتسلسل. أما في خطورة فورية، فإن زمن تضاعف المفاعل السريع أقصر كثيراً من المفاعل المهدىء، لأن معدل عمر النيوترونات السريعة الفورية يقل بألف مرة عن النيوترونات المهدئة والمتأخرة.

مصادر الوقود القابل للانشطار

تتألف المصادر القابلة للانشطار من رواسب اليورانيوم والثوريوم الموجودة طبيعياً. ويمكن تقدير هذين العنصرين في الأغلب بطريقة تقدير مصادر الوقود الأحفوري نفسها. وتبلغ موارد مصادر اليورانيوم المؤكدة بصورة (RAR)[3] معقولة في العالم بنحو 2.9 مليون طن. منها، نحو 0.9 مليون طن في الولايات المتحدة. وتبلغ كمية الاستخدام العالمي الحالي نحو 200 طن متري سنوياً لكل 1000 ميغاواط (كهرباء) من سعة محطة التوليد النووية. ويبلغ الإنتاج العالمي نحو 55000 ألف طن متري/ سنوياً لأن مجمل السعة التوليدية لمحطات القدرة النووية في العالم حوالى 275000 ميغاواط (كهرباء). وينتج عن هذه الأرقام نسبة احتياطي/ إنتاج (R/P) تزيد قليلاً على 50 عام لليورانيوم (انظر الفاصل الثاني). وباستخدام المقياس الثاني للموارد الطبيعية (انظر الفصل الثاني أيضاً) فإن المتبقي من الموارد القابلة للاستخراج في مجمل العالم تبلغ نحو ضعف المصادر المؤكدة. وهناك تقديرات مشابهة بالنسبة إلى الثوريوم الذي يبقى غير مستغل كمصدر للوقود.

ويبين الجدول 7-1 مقارنة لهذه التقديرات بين الموارد الانشطارية وموارد الوقود الأحفوري على أسس تساوي الطاقة الحرارية مقاسة بالكواد (انظر الفصل الرابع). ويبين الجدول أن موارد الولايات المتحدة من اليورانيوم تقارن من حيث حجم الطاقة الحرارية بالنفط والغاز. كذلك، فإن هذه التقديرات سارية المفعول على مستوى العالم أيضاً (انظر الفصل الخامس).

وبإمكان المفاعل المولد زيادة غلة خام اليورانيوم. فالمفاعل المولد يعزز إنتاج البلوتونيوم - ^{239}U القابل للانشطار والذي يستخدم بدوره كوقود – من ^{238}U من خلال القذف بالنيوترونات بشدة أكثر من المفاعل المهدىء. وبإمكان عملية التوليد هذه أن تُوجِد ما مقداره مئة مرة تقريباً، من الوقود الانشطاري من مقدار معين من اليورانيوم الطبيعي. لذا فإن التوليد بإمكانه نظرياً توفير مصادر طاقة تقارن بقيمة الطاقة الموجودة في الفحم أو تزيد عنها. وبإمكان تفاعل توليد مشابه تحويل الثوريوم الطبيعي (^{232}Th) إلى (^{233}U) وهو أيضاً يورانيوم انشطاري، وبذلك يوفِّر مصادر طاقة تقارن بالفحم.

3- إن المصادر المؤكدة بصورة معقولة تساوي تقريباً مصادر الوقود الأحفوري (انظر الفصل الثاني) مما يعني أن مقدار المواد القابلة للاستخراج عند سعر مثبت أو أقل منه (هنا هو 50 دولاراً لكل باوند وزناً بحسابات عام 1979) (انظر الفصل الخامس).

الجدول 7-1 مقارنة لموارد الوقود النووية والأحفورية في الولايات المتحدة لعام 1974 (الأرقام بالكوادريليون وحدة حرارية بريطانية).

	كمية الاحتياطي (أ)	موارد إضافية قابلة للاستخراج(ب)	قاعدة المورد المتبقية (ج)
النفط	410–530(د)	1100–2200	16000
الغاز الطبيعي	440 – 570(د)	1100–2200	7300
زيت السجّيل	900 – 3400(هـ)	7600(هـ)	150000(و)
اليورانيوم			
للمفاعلات الحرارية (ز)	310(ك)	630(ط)	8000(ط)
للمفاعلات المولدة (ح)	22000(ك)	44000(ط)	560000(ط)
الفحم	5000	(غير محدد)	78000

(أ) الاحتياطي هي الموارد القابلة للاستخراج اقتصادياً من رواسب مشخصة حيث يجري قياس أو استنتاج مدى الموارد على أساس الأدلة الجيولوجية.

(ب) الموارد الإضافية القابلة للاستخراج هي الموارد التي قُيّمت على أساس إمكانية استخراجها اعتماداً على أدلة جيولوجية واسعة، لكن لا تتوفر لها معلومات مفصلة كافية لتصنف ضمن الاحتياطي.

(ج) قاعدة الموارد المتبقية هي مجموع كمية الموارد المقدر أنها موجودة في الأرض، وعادة ما تكون بهيئة رواسب ذات نوعية تمثل الحد الأدنى المقبول أو أحسن بقليل.

(د) كان الاحتياطي في عام 1995 نحو 125 كواد للنفط ونحو 135 كواد للغاز الطبيعي في الولايات المتحدة.

(هـ) في رواسب تبلغ كمية النفط فيها 30 غالوناً للطن الواحد من زيت السجيل.

(و) في رواسب تبلغ كمية النفط فيها 10 غالونات للطن الواحد من زيت السجيل.

(ز) يعطي الطن المتري من أكسيد اليورانيوم (الكعكة الصفراء) في المفاعلات الحرارية تريليون وحدة حرارية بريطانية.

(ح) يعطي الطن المتري الواحد في المفاعلات المولدة 70 تريليون وحدة حرارية بريطانية.

(ط) بالنسبة إلى أكسيد اليورانيوم لغاية 10 دولارات/ للباوند وزناً.

(ك) بالنسبة إلى أكسيد اليوارنيوم لغاية 20 دولاراً/ للباوند وزناً.

مقتبس من:

S. D. Freeman, *A Time to Choose*, Ballinger, Cambridge MA. 1974 by The Ford Foundation, USEIA(1994,1995), and (USGS 1995).

تشغيل المحطات النووية

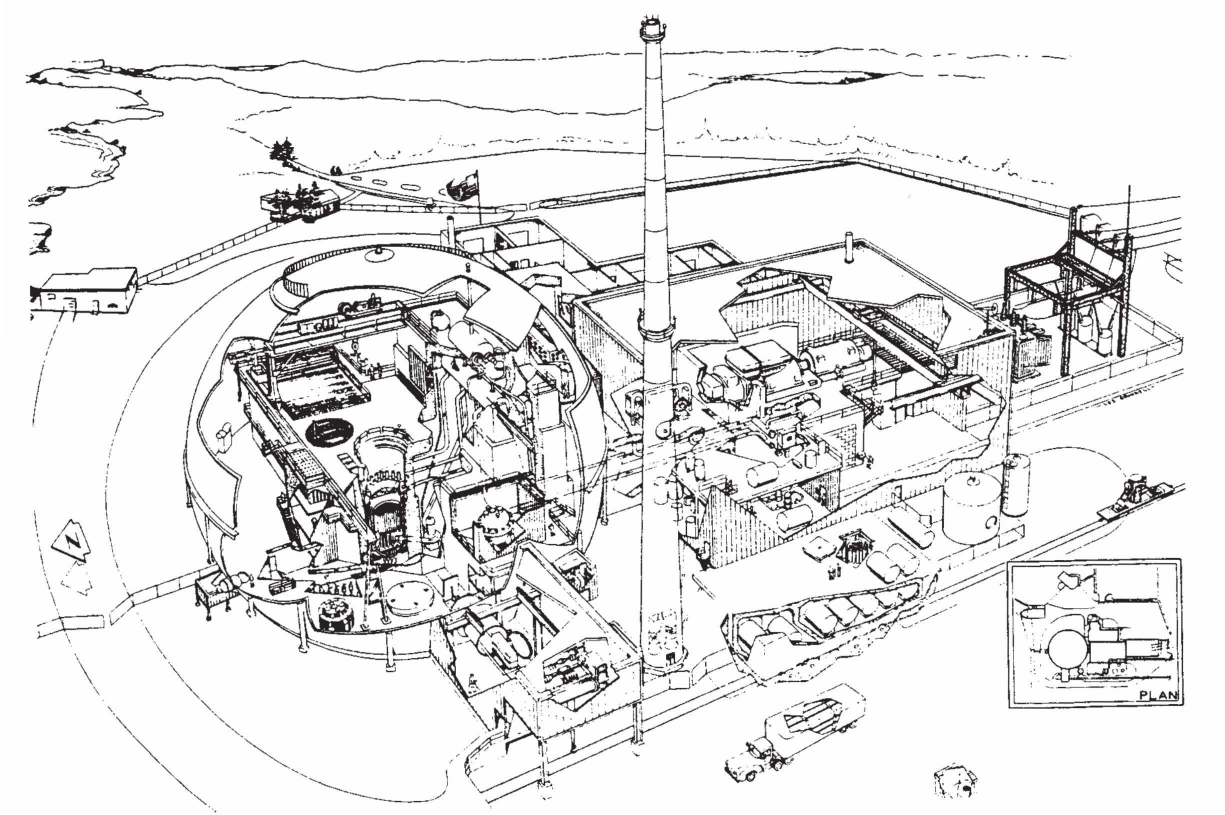
التشغيل الاعتيادي:

دعنا نتصور تشغيل مفاعل ماء مضغوط PWR في ظروف اعتيادية. يبدأ الفنيون تشغيل المفاعل من خلال سحب قضبان التحكم (انظر الشكلين 7-4 و7-5). وعند انزلاق القضبان إلى أعلى نحو قمة وعاء احتواء المفاعل يتنامى الفيض النيوتروني، وسرعان ما يبدأ التفاعل التسلسلي.

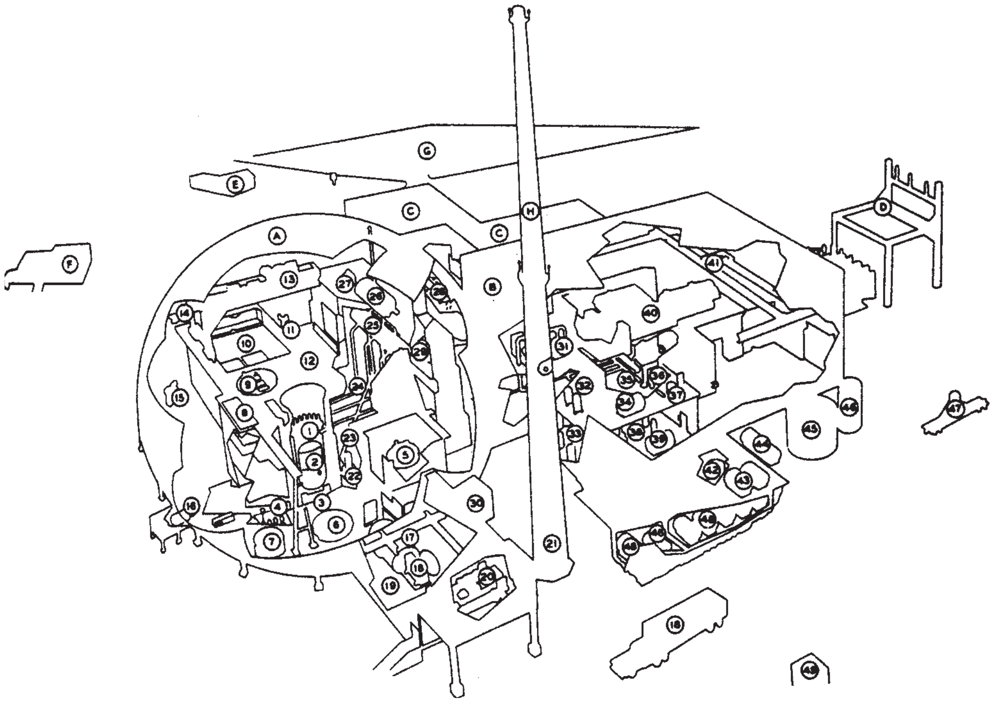
وكلما زاد سحب قضبان التحكم زادت إمكانية اصطدام نيوترونات التفاعل مع نوى انشطارية أخرى في التفاعل التسلسلي. وينتقل المفاعل بمجمله من المرحلة ما دون الحرجة (أي إن عدد النيوترونات أقل من المطلوب لإدامة تفاعل تسلسلي) وإلى المرحلة الحرجة، ومن ثم وقتياً إلى المرحلة ما فوق الحرجة، لإدامة النمو. ومع ازدياد عدد التفاعلات النووية تنمو القدرة الحرارية كذلك. ويستمر هذا النمو حتى يتم الوصول إلى مستوى القدرة الكامل. وعند ذلك يجري تنظيم وسائل التحكم للحفاظ على وتيرة مستقرة للتفاعل عبر الزمن وهو ما يدعى ـ الحالة المستقرة.

إن الحفاظ على وتيرة تفاعل مستقرة هي قضية تحكّم دقيق ومثال نموذجي للمتطلبات الدقيقة للتكنولوجيا النووية. ولا يقتصر الأمر على الحفاظ على توازن التفاعلات على وتيرة ثابتة وحسب، بل إن درجات الحرارة يجب أن يجري التحكّم بها بواسطة سرعة دوران سائل التبريد. إن الحفاظ على وتيرة تبريد كافية تُعّد من المتطلبات الحرجة ما يجعل الحاجة إلى نظام تبريد للحالات الطارئة ضرورة أساسية.

ويشغّل المفاعل، في حالة التشغيل الاعتيادية، في المدى الحرج ويولّد طاقة حرارية. ويجري نقل هذه الطاقة الحرارية بدورها في حالة مفاعل الماء المضغوط (الشكل 7-7)، بواسطة تدوير ماء التبريد. ويدور الماء في حلقة – الحلقة الأولية – من وعاء احتواء المفاعل إلى مولد البخار ثم يعود إلى المفاعل. أما مولد البخار فهو مبادل حراري يتم فيه نقل حرارة المفاعل إلى سائل العمل (البخار) في حلقة ثانية، معزولة مادياً عن مادة التبريد في الحلقة الأولية. ويتدفق البخار بدوره إلى شفرات التوربين ويعمل التوربين كمحرك أولي للمولد الكهربائي. أما في حالة مفاعل الماء المغلي (BWR – الشكل 7-6) فالبخار الناتج من المفاعل يتدفق مباشرة إلى التوربين لتدوير شفراته.



الشكل 10-7: **محطة قدرة نووية – منظر مقتطع**
بسماح من CONSUMERS POWER COMPANY, BIG ROCK POINT NUCLEAR PLANT CHARLEVOIX, MICHIGAN.



منظر مقتطع لمحطة القدرة النووية في بيغ روك

1 - وعاء احتواء المفاعل
2 - قلب المفاعل
3 - أداة تشغيل تخصيب التحكم
4 - أداة تشغيل قضيب التحكم – المنظومة الهيدروليكية
5 - رأس وعاء احتواء المفاعل
6 - سداد درع وعاء احتواء المفاعل
7 - العزل الحراري لراس وعاء احتواء المفاعل
8 - منطقة خزن الوقود الجديد
9 - منطقة إعادة التزويد بالوقود
10 - حوض خزن الوقود
11 - وعاء التحويل
12 - أرضية منطقة المفاعل
13 - رافعة سقفية (75 طناً)
14 - رافعة جدارية
15 - وحدة التدفئة والتهوية
16 - مخرج للبشر للهروب
17 - مخرج للمعدات
18 - حاويات شحن الوقود الجديد
19 - حوض التفريغ

20 - رافعة التفريغ
21 - مراوح التهوية
22 - مضخة التدوير للمفاعل
23 - أنبوب نازل
24 - مصعّد الماء لتوليد البخار
25 - أسطوانة البخار
26 - مكثف الطوارئ
27 - خزان السم السائل
28 - غرفة التحكم – منظر خلفي
29 - مخرج البشر
30 - غرفة تهوية كرة الاحتواء
31 - مضخة تغذية الماء للمفاعل
32 - مرشحات الرمل
33 - مزيل أملاح المكثفات
34 - خزان ماء تغذية المفاعل
35 - مسخنات ماء تغذية المفاعل
36 - المكثف الرئيس للتوربين
37 - خزان الماء الإضافي لمزيل الأملاح
38 - مضخات المتكثفات
39 - خزان القلويات (NaOH)

40 - وحدة التوربين – المولد (75 ميغاواط كهرباء)
41 - رافعة بناية التوربين (75 طناً)
42 - مرشحة سائل الفضلة الإشعاعي
43 - خزان احتواء سائل الفضلة الإشعاعي
44 - خزانات الحامض (H_2SO_4)
45 - خزان احتواء المتكثفات
46 - خزان احتواء الماء مزال الأملاح
47 - حاوية شحن الوقود المستنفد
48 - خزانات سوائل الفضلة المشعة
49 - وسائل المعايرة

A - بناية الاحتواء الكروية
B - بناية التوربينات
C - بناية المكتب الإداري
D - محطة كهرباء ثانوية
E - مركز معلومات
F - بئر وبناية مضخات

والعملية، كما هي مصممة، محتواة ذاتياً (انظر الشكل 7-10 عن الاحتواء وعن التدريع) ولا تطلق عملياً أي مادة إلى الجو ما عدا عادم البخار. وليس هناك في هذه الحالة من ضرورة لإضافة أكداس قبيحة المنظر من الوقود أو المخلفات خارج المحطة، أو أي صفوف طويلة من عربات السكة الحديد أو من مراكب النقل النهري حول المحطة. وبهذا تكون صورة المحطة الانشطارية مختلفة بصورة كبيرة عن تلك التي تستخدم الفحم كوقود. وهذه المميزات، هي من بين الفوائد التي يعددها دعاة هذه التكنولوجيا (عادة ما يكون المنظر المتداول لمحطة توليد نووية أبراج التبريد فيها. وهذه كما رأينا في الفصل الثالث لا تقتصر على المحطات النووية).

وتكون كافة المواد المشعة خلال التشغيل الاعتيادي، عملياً، محتواة ضمن منظومة المفاعل، ولا يسمح إلا لكميات ضئيلة من العناصر الإشعاعية قصيرة العمر بالتصريف إلى الجو. إن تجهيز المفاعل والمكونات الملحقة بدروع واقية مطلوب قانوناً لتأمين صحة وسلامة العاملين في المحطة. ويصمم هذا التدريع الواقي بالإضافة إلى تحديد تصريف المواد المشعة، للإيفاء بمتطلبات معايير الصحة العامة للسكان خارج المحطة. إن وكالة التنظيم النووي الوطنية في الولايات المتحدة (USNRC) مكلّفة بموجب قانون الطاقة الذرية بتطبيق كل معايير الصحة والسلامة لمحطات القدرة النووية والفعاليات ذات العلاقة. وقد وضعت هذه الوكالة معياراً لمستوى التعرض الأعلى (المسموح به) للعموم من أي منشأة نووية بحيث لا يتجاوز 25 ملريم/ السنة، كجرعة لمجمل الجسم[4]. وهكذا، حاول البعض أن يبرهن أن شخصاً يعيش قرب سياج محطة نووية سيدّخر جرع إشعاع إضافية تقل عن الإشعاع الطبيعي السائد عند سطح البحر من الأشعة الكونية البالغ 50 مليريم/ السنة.

إن معايير الإشعاع لنمط التشغيل الاعتيادي ذات علاقة بالإشعاع واطئ المستوى. ويخص هذا التعبير بصورة عامة الجرعات عند أو دون المستويات الطبيعية السائدة.

---

4 ـ تقاس الجرع الإشعاعية بوحدة الريم Rem (وهي الحروف الأولى من مكافئ رونتغن للإنسان (Roentgen Equivalent Man)) لوضع قياس لأثر الإشعاع المؤين في الإنسان. ويمكن أن تحدد لمجمل جسم الإنسان (جرعة مجمل الجسم) أو لأعضاء محددة تعتبر حساسة مثل الغدة الدرقية. وتحمل الإشعاعات المؤينة مثل ألفا وبيتا وغاما إشعاعاً/ جسيمات من التفاعلات النووية ذات كثافة مجهرية عالية من الطاقة تعتبر مدمّرة للأنسجة الحية. ويحدد (الريم) بمقدار الطاقة التي تمتص مجهرياً في وحدة كتلة من النسيج الذي يقوم بالامتصاص وحسبما تعدّل بعامل النوعية للنسيج اللين مقابل النسيج القاسي (أي العظم).

إن التأثيرات في الصحة المهنية أو الصحة العامة ليس لها في هذه المستويات من أسباب أو تأثيرات واضحة. وقد أثارت هذه المعايير، بالرغم من ذلك، جدلاً بالنسبة إلى عتبات الخطورة. إن مفهوم العتبة قد التقيناه مسبقاً في بحثنا عن معايير نوعية الهواء (انظر الفصل السادس). والمسألة هي في الحالتين، إلى أي مدى تبرز الحاجة للضوابط البيئية لكي تكون دون مستوى التلوث بسبب وجود أو عدم وجود علاقة واضحة لعامل السبب/ التأثير؟ سنقوم ببحث المترتبات لهذه المسألة في الملحق (ب). غير أننا يجب أن نلاحظ هنا عدم وجود سياسة تنظيمية منسقة في الولايات المتحدة حالياً بخصوص هذه العتبات.

تأثيرات التشغيل الاعتيادي للمحطات النووية

لنترك جانباً مسألة معايير الإشعاع واطئ المستوى، ولنعقد مقارنة بين المنافع المتوخاة وكلفة التوليد الكهربائي بالطاقة النووية[5].

الاستخراج

لا يعتري تعدين اليورانيوم مهنياً ذلك القدر من الحوادث مقارنة باستخراج الفحم رغم أن العمليتين تجريان تحت الأرض. ومع ذلك فهنالك أدلة تشير إلى أن أخطار الإشعاع قد أثّرت في نسب الوفاة الكلية لعمال التعدين[6]. إضافة إلى ذلك قد تكون هناك مترتبات على الصحة العامة تنتج من تعدين اليورانيوم. فمخلفات أو فضلات خام اليورانيوم تترك عادة في العراء بشكل أكداس مفتوحة قد تشكل خطورة على الصحة.

5 - يرجى ملاحظة أن التأثيرات التي ستبحث هنا للتكنولوجيا النووية ستكون موازية لتلك التي جرى بحثها في الفصل السادس عن تكنولوجيات الوقود الأحفوري. وقد جرت مقارنة لهاتين التكنولوجيتين في هذه الخطوات المتوازية في الدراسات التالية:

National Research, National Academy of Sciences, 1977,
Council, Implications of Environmental Regulations for Energy Production and Consumption, Vol. 6, Analytical Studies for the U.S. Environmental Protection Agences
Washington, D.C.

6 - تقدر الإصابات والوفيات لعمال تعدين اليورانيوم بنسب منخفضة تبلغ واحد بالعشرة من تلك التي تحدث في تعدين الفحم تحت الأرض. ومع ذلك فإن الأرقام عن المرض والوفيات بسبب تعدين اليورانيوم موضع جدل بسبب طبيعة الإصابات نتيجة الإشعاع التي يجب أن تحتسب كنسب سرطان أكثر من المعدل. وقد قدرت الأكاديمية الوطنية للعلوم (1977) هذه الأمراض المهنية بنحو واحد من خمسة من نسب مرض الرئة السوداء وهو المرض المقارن من استخراج الفحم.

النقل (اليورانيوم المعالج)

لم يبلّغ عن أي آثار مقاسة أو محسوسة نتيجة نقل الخام من المنجم إلى منشآت المعالجة. وقد تكون هذه الخطوة قابلة للمقارنة بشحن الفحم إلى موقع إعداده لكي يحرق. غير أن الوقود النووي يمر مع ذلك في مرحلة أخرى: وهي شحن قضبان الوقود المعالجة إلى محطة التوليد النووية. وهنا أيضاً لم يبلغ عن أي آثار بيئية. ومع ذلك فقد أبدى بعض المسؤولين المحليين وغيرهم قلقهم من إمكانية وقوع حوادث أثناء النقل، ما قد ينتج عندها إراقة أو انتشار بعض المواد المشعة.

المعالجة

تشمل معالجة الوقود النووي عمليتي تخصيب اليورانيوم وصنع قضبان الوقود. ويمكن مقارنة عمليتي التخصيب وتصنيع القضبان منطقياً بخطة الإعداد في دورة الفحم رغم أن معالجة الوقود النووي عملية أكثر تعقيداً بدرجة هائلة من الناحية التكنولوجية. ويبدو أن الأخطار المهنية للعاملين في صناعة الوقود النووي أقل من تلك التي تصيب العاملين في استخراج وإعداد الفحم، رغم وجود جدل يتوقع أن يستمر في ما يخص المعايير، وبخاصة تلك المتعلقة بالمستويات المقبولة للخطورة (انظر الملحق ب).

المفاعل

تقارن هذه كخطوة في عملية الطاقة النووية بخطوة الاحتراق للفحم. وعلينا هنا أن نكون حذرين من حيث إننا نعتمد أوضاع التشغيل الاعتيادية بخلاف الأوضاع غير الاعتيادية أو أوضاع الحوادث. والأثر البيئي أو الأثر في الصحة العامة الذي تولّده المحطات النووية في ظروف العمل الاعتيادية أقل من مثيلاتها في المحطات العاملة بالفحم. أما الأخطار بالنسبة إلى مشغلي المحطات فربما تكون (أو أنها كانت) على أي حال أكبر من المحطات النووية مقارنة بالمحطات العاملة بالفحم. وتشير المعلومات التاريخية عن العاملين في المحطات النووية والتي تعود إلى الأيام الأولى للصناعة إلى جرعات إشعاعية يقل معدلها قليلاً عن ريم واحد/ السنة (أي 1000 مليريم/ السنة). غير أن مدى الجرعات المستخدمة يشمل جرعاً تبلغ عدة مئات من الريم/ السنة. وقد جرى تسجيل عدد متميز إحصائياً من حالات السرطان[7] المتجاوزة

7 - جرى تسجيل 0.02 حالة سرطان أكثر من المعدل لكل 1000 ميغاواط كهربائي لكل سنة تشغيلية.

للمعدل بين العاملين في المحطات النووية. ومن ناحية ثانية تم منذ عام 1969 تقليل معدل الجرعة السنوية للعاملين في المنشآت النووية إلى النصف – ولا تسمح التعليمات الاتحادية حالياً بما يزيد على 5 ريم/ السنة (أي 5000 مليريم/ السنة) لأي فرد يعمل في المنشآت النووية – وهو رقم ما زال يتجاوز مستوى التعرض للإشعاع الطبيعي المحيط بصورة ملحوظة.

طرح المواد النووية

سوف نتعامل في هذا الفصل مع قضية الخزن قصير المدى (في الموقع) للنفايات النووية (وبخاصة قضبان الوقود المستنفد) بدل الخزن طويل – المدى (بعيداً عن الموقع)، أو عن إعادة المعالجة أو التخلص الدائمي ـ وهي قضايا ما زال حلها غير متوفر، وستبحث في الفصل الثامن. ويجري موقعياً في المفاعل الحفاظ على معيار الجرعة البالغ 25 مليريم/ السنة كمعيار لأغلب الأوقات المذكورة، لذا بإمكاننا الاستنتاج أن خزن الوقود المستنفد موقعياً له أثر بيئي في المنطقة أقل من طرح فضلات الفحم.

والقلق البيئي الآخر ناجم عن التصريف الحراري من كلا نوعي المحطات النووية والعاملة بالفحم (فكلاهما من النوع الحراري). والحرارة المصرفة قد أثارت بعض الهموم البيئية لأنها يمكن أن ترفع درجة حرارة الأجسام الطبيعية، وبخاصة المياه، ما يقتل الحياة النباتية والحيوانية. ويمكن السيطرة على المشكلة بواسطة أبراج التبريد (انظر الفصل الثالث) التي تساعد على تحديد درجة حرارة المواد التي يجري تصريفها لتبقى ضمن الحدود النظامية. ولا يوجد إلا قليل من الفروق بين التأثيرات الحرارية للمحطات النووية وتلك العاملة بالفحم، رغم أن المفاعلات العاملة بالماء الخفيف تصرف حرارة أكثر، وبذلك تحتاج تبريداً أكثر من خلال تلبية المعايير الخاصة بتبريد المواد النابذة أو المستنفدة.

القضايا التي ما زالت تنتظر الحل – السلامة والتخلص من الفضلات والانتشار

يؤكد أنصار التكنولوجيا النووية مميزات التشغيل الطبيعية لمحطات توليد القدرة النووية. ويستطيعون من خلال اللجوء إلى هذه الحالة أن يظهروا أن التأثيرات البيئية الموقعية أقل في حالة المحطات النووية مقارنة بمحطات الوقود الأحفوري، كما إنها

تترك انطباعاً نظرياً أفضل. وقد ادعى الأنصار أيضاً أن انتقالاً كبيراً من حرق الوقود الأحفوري إلى الطاقة النووية بصورة أساسية، يمكن فقط أن يوفر استجابة تقنية للمأزق بعيد المدى لتأثير البيت الزجاجي وثاني أكسيد الكربون (انظر الفصل السادس). وما يقابل هذه الادعاءات على أي حال هو الجدل الدائر حول سلامة المنشآت النووية والتخلص من النفايات النووية على المدى البعيد وانتشار الأسلحة النووية.

سلامة المنشأة النووية

عندما نتكلم على سلامة المحطة النووية فإن كلامنا ببساطة يعني منع الإطلاق أو التسرب العرضي للمواد المشعة خارج المنشأة، ما يعرض الجمهور لمخاطر الأمراض الإشعاعية والسرطان. ورغم أن سلامة المحطة مسألة معقدة إلا أننا نريد أن نركز على أهم أنواع الحوادث النووية التي يطلق عليها حوادث فقدان المبرد (LOCA). ووَفْق ما تعلّمنا في بحثنا عن تشغيل المفاعل لا بد من أن يجري تدوير سائل التبريد خلال المفاعل لإزالة الحرارة التي تولدها تفاعلات الانشطار. وإذا ما تعرض دوران المبرد لأي سبب كان، فإن تراكم الحرارة سيرفع درجة الحرارة التي إذا ما سمح لها بالاستمرار ستؤدي إلى انصهار قلب المفاعل.

وإذا لم يجرِ احتجاز تلك الحرارة ضمن بناية الاحتواء (الشكل 7-1 والشكل 7-10) فبإمكان قلب المفاعل المنصهر إطلاق مخزون مدمر من المواد المشعة إلى الجو. إن المخزون الإشعاعي مقاساً بالكيوري (ورمزها Ci انظر الفصل الثامن) لمفاعل تجاري كبير تزيد بآلاف المرات من مقدار الإشعاع الذي أطلقته القنبلة الانشطارية التي أُلقيت على مدينة هيروشيما، ما يجعل الإمكانية الكامنة للكارثة كبيرة في الواقع.

ويمكن لحادثة فقدان المبرد أن تنشأ بسبب عدد من الأمور الأساسية المتعلقة بتأسيس الأنابيب وأكثرها مسائل تبدو عادية جداً ـ وهو أمر مستغرب عندما نفكر في صورة «عالي التقنية» للعمل. فقد جرى التبليغ مثلاً عن سبع حالات لعطب صمامات خلال عام واحدة لمجموعة من 17 محطة خلال عام 1972 مثلا وهو زمن مبكر بالنسبة إلى المحطات النووية الكبيرة. وكان صمام عاطل أحد الأسباب البارزة في حادثة (ثري مايل آيلاند) عام 1979. وقد قللت السيطرة النوعية الصارمة على الصمامات من

مثل هذه الحوادث، لكن إمكانية حدوث مثل هذا الخلل ما زالت قائمة ولا يمكن التخلص منها كلياً.

وهناك أنواع أخرى من الخلل الميكانيكي الذي يمكن أن ينشأ عنها تتابع يؤدي إلى حادث: فأنابيب الضغط العالي يمكن أن تنفجر، كما يمكن أن تعطل المضخات وكل هذا قد حدث فعلاً في المحطات النووية. ويمكن للمعدات الكهربائية أن تفشل أيضاً: فأعطال قواطع الدورة والمولدات والبطاريات والمحولات وأجهزة التحسس أو القياس الكهربائية قد عانتها المحطات النووية أيضاً، ويمكن أن تكون أسباباً لنشوء حوادث في المحطات.

والشيء المهم الواجب إدراكه في البدء عند تقييم مثل هذه الأعطال التكنولوجية هو أن حدوثها لا يمكن أن يُختزل نهائياً. لذا فإن السؤال الأساسي هو ليس منع أعطال محددة منعاً باتاً، بل بالأحرى كيف نتعامل مع أي عطل ضمن النظام الشامل بطريقة مقبولة. لذا فإن أسلوب العمل هو كيفية تصميم وهندسة النظام ككيان يعمل بطريقة آمنة ومقبولة. وقد استخدمت مثل هذه الطرق في سلامة الطائرات وفي تخطيط سفرات الفضاء[8].

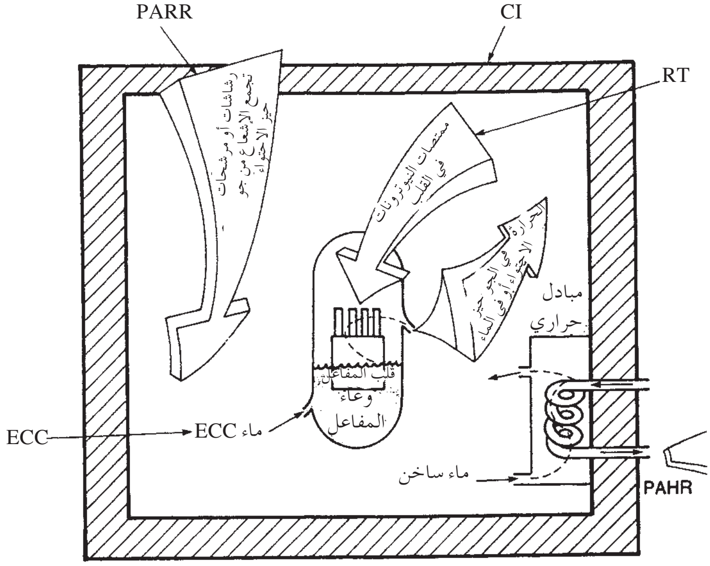
لقد أصبحت سلامة التشغيل أحد مصادر الاهتمام الرئيسة في البرنامج النووي للولايات المتحدة في بداية عقد السبعينيات. وسرعان ما أدركت إمكانية عطب المعدات، بل حتى معدات السلامة المصممة لمعالجة مثل هذه الأعطاب قد تصاب هي الأخرى بالعطب. بوشر نتيجة ذلك، بإجراء دراسات عن سلامة المنشآت رغم وجود جدل حول ما يمكن أن يعتبر دراسة وافية بالغرض عن السلامة (Ford, 1982). وأفضل دراسة معروفة عن سلامة المفاعلات قام بها البروفسور نورمان راسموسن (Norman Rasmussen) من معهد ماساشوسيتس للتكنولوجيا لحساب القسم المختص بسلامة المفاعلات من وكالة الطاقة الذرية (وهو الجزء الذي أقرته وكالة التنظيم الوطنية النووية). وأصدرت الدراسة وهي تحليل إحصائي لعمل المنشأة المعقد وأنظمة السلامة كتقرير عام 1975 تحت رقم WASH 1400 من قبل وكالة التنظيم

8 ـ لم يكن هناك أي تعاون بين مجموعة دراسة سلامة المفاعلات التي شكلتها وكالة الطاقة الذرية ووكالة التنظيم الوطنية التي قدمت ما عرف باسم تقرير (WASH 1400) وبين برامج السلامة لإدارة الطيران الاتحادية أو لوكالة الفضاء (ناسا) اللتين واجهتا هموماً مماثلة (فورد، 1982).

الوطنية. وكان لهذا التقرير وزنه الكبير في كافة النقاشات عن السلامة خلال العقد التالي. وكان يعرف بأسماء مختلفة مثل WASH 1400 أو تقرير راسموسن (وسنذكر هذا التقرير بصورة متكررة عند بحثنا في سلامة المفاعلات).

نظام السلامة المهندسة

أخذ أسلوب التعامل مع السلامة بالنسبة إلى المنشآت النووية بصورة عامة طريقة نظام السلامة المهندس (ESS) اختصاراً لعبارة Engineered Safety System. وينفذ هذا النظام خمسة أفعال رئيسة، كما يبينه الشكل 7-11 وهذه الأفعال اختصاراً هي:



الشكل 11.7: منظر تخطيطي لنظام السلامة المهندسة (ESS) لمفاعل مبرد – بالماء

المصدر: U.S. Atomic Energy Commission (1975). Wash – 1400 Washington. D.C.

كَبوة المفاعل (Reactor Trip) (RT): وهو إيقاف أوتوماتيكي سريع جداً لتوليد القدرة الحرارية في القلب بواسطة الإدخال السريع لقضبان التحكم. وغالباً ما يدعى هذا النوع من الإيقاف في الصناعة سكرام (Scram).

تبريد الطوارئ للقلب (ECC) أو :Emergency Core Cooling وقد صمم هذا النظام لتوفير وسائل مستقلة لتوفير ماء التبريد إلى القلب من خلال إغراق وعاء المفاعل. وهو يتطلب مصدر ماء مضغوط مستقل تماماً يمكن أن يدوّر خلال وعاء المفاعل (حتى إذا

أصاب عطبٌ من نوع مختلف الأنظمة الأخرى كمنظومة التبريد الأولية أو المضخات أو الكهرباء).

إزالة الإشعاع بعد الحادث (Post Accident :Radiation Removal) (PARR) يقوم هذا النظام المؤلف من المضخات والمرشحات بتجميع المواد المشعة وإزالتها من بناية الاحتواء. ويجري رش الجو والأسطح ثم يجمع ماء الغسل الملوث ويُمرر خلال مرشحات.

إزالة الحرارة بعد الحادث (Postaccident Heat Removal) (PAHR): وهذا ما يوفر وسائل مستمرة لإزالة الحرارة من القلب بعد إيقاف تفاعل الطاقة الرئيس بواسطة عملية إيقاف المفاعل (RT). وعملية (PAHR) ضرورية بسبب حرارة التحلل للتفاعلات الإشعاعية الذاتية التي تولد طاقة حرارية تبلغ 7 في المئة من مجمل الطاقة الحرارية بعد الإيقاف. ولا يعود مستوى الحرارة إلى مستويات آمنة إلا بعد أسابيع.

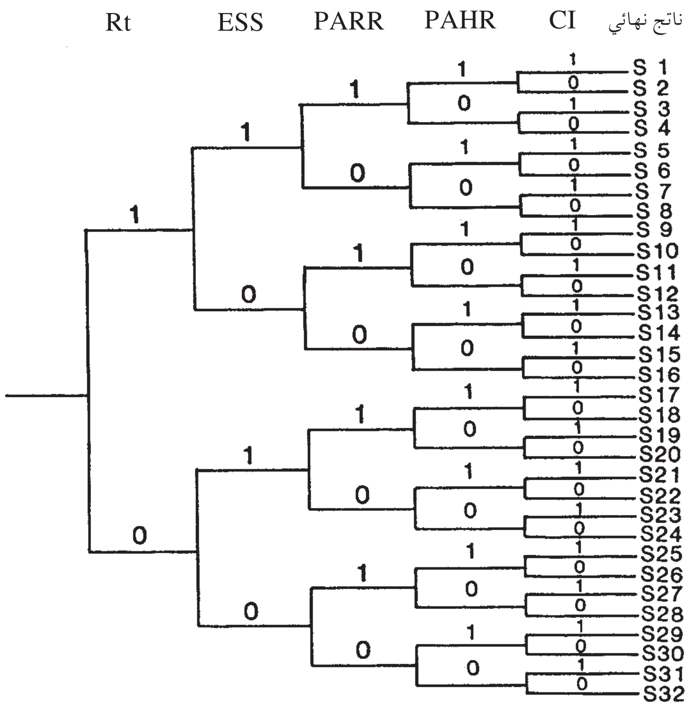
تكامل الاحتواء (Containment Integrity) :(CI) وتشير CI إلى بناية الاحتواء (انظر الأشكال 7-10 أو 7-11) التي يوفر تكاملها البنيوي آخر الخطوط الدفاعية ضد انطلاق المواد المشعة إلى الجو بصورة كبيرة، وذلك إذا ما فشلت كافة وسائل السلامة المهندسة الأخرى.

وقد قام المحللون بتقييم مهمات نظام السلامة المهندسة ESS وفيما إذا كانت ذات طبيعة سليمة بصورة مقبولة وتقييم الاحتمالات لفشل كل جزء من أجزائه. ويجب تحليل إمكانية الفشل للأجزاء المختلفة في تتابع لخطوات منفصلة، لأن المترتبات لأي فشل تعتمد على حدوث حالات فشل مسبقة. إن مثل هذا التحليل التتابعي للاحتمالات يدعى بتحليل شجرة الفشل (Fault Tree) ويمثل بشكل شجرة (الشكل 7-12) وتدعى بشجرة الأحداث (Event Tree). وكانت تلك هي منهجية دراسة السلامة التي أعدها راسموسن.

وشجرة الأحداث وسيلة لاستقصاء تتابع حالات الفشل الممكنة. لذا فهي توفر الإطار المنطقي لتقييم الاحتمالات المدمجة لحالات الفشل المتتابعة. وكل ملتقى متشعب في الشجرة يمثل الحصيلة الثنائية (إذ إن 1 يمثل النجاح بينما 0 يمثل الفشل)

لتنفيذ خطوة في نظام السلامة المهندسة. وهكذا مثلاً فإن الملتقى الأول يمثل نجاح أو فشل عملية إيقاف المفاعل (RT) فيما إذا كانت ستنفذ بطريقة صحيحة أم لا. وعند أخذ نتيجة هذه الخطوة هناك احتمالان بعد ذلك لخطوة نظام السلامة ECC لكل من حصيلتي (RT)، أو ما مجموعه أربع حصائل ممكنة في مستهل خطوة (PARR). وهناك لمجمل النظام كما هو ممثل هنا 32 حصيلة نهائية ممكنة (انظر الشكل 7-12 في الجهة اليمنى).

إن الحصيلة S1 مثلاً تعني أن كل الخطوات الخمس عملت بنجاح. فالتفاعل التسلسلي أوقف (RT)، واستلم القلب تبريد الطوارئ (ECC)، وجرت إزالة الإشعاع ما بعد الحادث بسلام (PARR)، كما أزيلت حرارة التحلل ما بعد الحادث (PAHR)، ولم تسمح بناية الاحتواء لأي إشعاع بالتسرب إلى الجو (CI).



الشكل 7-12: شجرة إحداث تصور مهمات تؤدي في حادث فقدان ماء التبريد في المفاعل.
المصدر: U. S. Nuclear Regulatory Commission.

أما المحصلة S13 من ناحية أخرى، فتمثل فشلاً جزئياً لنظام السلامة المهندسة. فبعد إيقاف المفاعل (RT)، فشلت أنظمة تبريد قلب المفاعل (ECC) وإزالة الإشعاع (PARR) وإزالة الحرارة (PAHR)، ما ترك بناية الاحتواء (CI) كخط دفاع أخير ضد الكارثة المتمثلة بتسرب المواد المشعة. وأخيراً فإن الحصيلة S32 تمثل فشل جميع الأنظمة بما فيها كبوة المفاعل وبناية الاحتواء وهذا يعني على وجه التأكيد تسرب كميات هائلة من المواد المشعة إلى الجو.

ويجب أن يكون لكل خطوة في شجرة الأحداث احتمالية فشل تخصص لها لكي يجري تقييم السلامة الإجمالية لنظام السلامة المهندس. ومن المعقول أن نتوقع أن تكون الاحتمالات مستندة إلى إحصائيات مشتقة من خبرة التشغيل على المدى الطويل، مع كل أداة أو نظام فرعي في كل خطوة.

وهكذا مثلاً ستستند احتمالية فشل نظام الطوارئ لتبريد القلب إلى الخبرة الفعلية عبر سنين عديدة لمثل هذه الأنظمة في المحطات النووية، أو على الأقل اختبارات واسعة متكررة لأنواع ريادية. والحقيقة أن مثل هذه الخبرة الطويلة لم تكن موجودة عند إعداد دراسة سلامة المفاعلات (WASH 1400)، كما لم تكن أي اختبارات قد نفذت[9].

عند النظر في احتماليات الفشل في كل خطوة من خطوات «شجرة أحداث» من هذا النوع يجب توقع كل احتمالات الفشل. إن توقع كل طريق ممكن أن يؤدي إلى الفشل بالنسبة إلى نظام تكنولوجي بتعقيد وتطور محطة قدرة نووية مهمة هائلة لا شك. ويقر من ينتقد أسلوب شجرة الأحداث/ الفشل كأمر مفروغ منه أن المهمة مستحيلة. فالخبرة التشغيلية والاختبارات الواسعة كما يقال أكثر أهمية للتقييم الإجمالي من تقييم أجزاء مفردة، ذلك لأن الثقة في توقعات الاحتمالات الكاملة تعتمد على الثقة في عدم إسقاط أي من احتمالات تحليل الشجرة.

9 ـ كان مخطط إجراء اختبار ريادي على مفاعل ماء مضغوط صغير (55 ميغاواط) من قبل NRC/ AEC وأعطى اسم (Loss of Fluid test) أو LOFT وكان متوقعاً إجراءه موقعياً في ولاية أيداهو لكنه لم يكن قد نفذ حتى حين وقوع الحادث في ثري مايل آيلاند عام 1979. وقررت NRC بعد ذلك إعادة تقييم برنامج السلامة النووية بكامله. وفشل مسؤولو NRC إثر ذلك في الاتفاق على الحاجة لاختبار LOFT وعلى دور الاختبار النموذج الريادي، لذا لم تجرِ إعادة برمجة الاختبار.

احتمالات الحادث

دعنا بعد ذلك ننظر كيف أن الاحتمالات في دراسة راسموسن للسلامة تجمعت في التوقع بوقوع حادث جسيم وما يترتب عليه.

احتمالية وقوع حادث البدء. يفترض التقدير شمول كافة الأحداث الممكنة التي قد تؤدي إلى فقدان المُبرِّد. ويجب أن يشمل التقدير أسباب داخل المنشأ (فشل الصمامات مثلاً) وأيضاً الأسباب الخارجية (مثل الهزات الأرضية). وكان تقدير الاحتمالية في تقرير راسموسن مأخوذاً نظرياً عبر كافة الأسباب التي جرى تخيلها هي 1 في كل 100 عام مفاعل[10] (ويعبر عن ذلك بالطريقة التالية: 10^{-2} لكل مفاعل سنة).

احتمالية فشل كافة مراحل نظام السلامة المهندسة في ما عدا تكامل بناية الاحتواء (CI). وهنا تكون كافة الخطوات الرئيسة (PAHR، PARR، ECC، RT، أي الحصيلة التي يمثلها المسلك 531 في شكل 7-12). قد فشلت ولم يمنع إطلاق كميات كبيرة من الإشعاع سوى تكامل بناية الاحتواء. وكان تقدير راسموسن هو 1 في 100 عام مفاعل أو 10^{-2} لكل مفاعل سنة.

احتمالية فشل تكامل بناية الاحتواء (CI) وقد جرى في هذه الحالة انتهاك تكامل البناية بسبب قوى تطورت خلال تتابع الحادث ذاته (ضغط بخار عالٍ بدرجة هائلة مثلاً) كما تمثل ذلك الحصيلتان S8 أو S24 في الشكل 7-12، أو بسبب آخر (إجهادات هزة أرضية مثلاً). وكان التقدير 1 في كل 100 مفاعل سنة.

احتمالية التعرض لأسوأ أنواع المناخ: ويشير هذا إلى اجتماع عوامل مناخية شديدة كتوافق اتجاه الريح والمطر وما إلى ذلك، ما يؤدي إلى ترسب المادة المشعّة فور تسرّبها وعلى أكبر عدد من السكان بجوار المحطة. وقدرت هذه الاحتمالية بنسبة 1 في 10 (10^{-1}) في أي وقت تحدث فيه حادثة. وهذه الاحتمالية تتبع فشل كافة مراحل نظام السلامة المهندسة وهي ليست بذلك جزءاً من شجرة الأحداث في الشكل 7-12.

---

10 ـ وهذا ما يعني وقوع حادث واحد كل مئة سنة لمفاعل واحد. وإذا ما نظرنا إلى مئة مفاعل فهذا يعني وقوع حادث واحد بينها كل سنة.

احتمالية وقوع حادث في موقع تقطنه أعلى كثافة سكانية – وقد وضعت دراسة راسموسن معدلاً لكل المواقع النووية في الولايات المتحدة لتقدر احتمالات حدوث حادث مثل هذا في موقع الكثافة السكانية الأكبر. وكان التقدير 1 في 100 أو(10^{-2}) من المواقع. (إثر نشر دراسة راسموسن جرى تقييم احتماليات الحادث ومترتباته لكل منشأة نووية).

إن احتمالات الفشل هذه يمكن أن ترتبط منطقياً في فشل مضاعف ناتج من مجموع احتماليات الفشل المفردة شريطة أن تكون الاحتمالات المفردة هذه مستقلة إحداها عن الأخرى. ويستمر تقرير راسموسن على هذا الافتراض ليعطي احتمالية إجمالية لحادث كانت مجموعة الدراسة[11] مقتنعة أنها ستبدو منخفضة إلى درجة تقبلها الجماهير. وجاء استنتاجهم:

1 ـ احتمالية حصول حادث كارثي (مرجعي) كحالة انصهار القلب[12] هي:

احتمالية انصهار القلب	=	احتمالية وقوع حالة ابتداء حادث	×	ESS (احتمال فشل نظام السلامة)
10^{-4}	=	10^{-2}	×	10^{-2}

أي إن احتمالية حصول حادث مرجعي هي 1 لكل 10000 سنة عمل

أو 1 لكل 100 سنة لـ 100 مفاعل قيد العمل.

2 ـ حدوث احتمالية حصول أسوأ حادث (من حيث كارثيته) كالآتي:

احتمالية حصول أسوأ حادث	=	احتمالية انصهار القلب	×	(احتمالية فشل بناية احتواء المفاعل) CI	×	احتمالية حصول أسوأ حالة مناخية	×	احتمالية تعرض كثافة سكانية عالية
10^{-9}	=	10^{-4}	×	10^{-2}	×	10^{-1}	×	10^{-2}

وهذا يعني 1 في كل 1,000,000,000 مفاعل عام أو واحد في كل عشر ملايين عام لمئة مفاعل قيد العمل.

11 ـ يعطينا (Ford, 1982) صورة حية موثقة بالسجلات من NRC/ AEC لبيروقراطية تتوقع مسبقاً استنتاجات الدراسة العملية التي كانت مكلفة بتنفيذها.

12 ـ جرى تعريف (حادث مرجعي) في الأصل كحادث جسيم إنما من دون تسرب كارثي لمواد مشعة. وقد جرى في تاريخ لاحق إطلاق اسم (Meltdown) أي انصهار فقط على مثل هذا الحادث.

ثم ادعت الخلاصة التنفيذية لتقرير راسموسن أن «فرصة أن تقتل بواسطة حادث نووي بعيدة بعد فرصة أن يصيبك نيزك سماوي». وأقر دعاة هذا النوع من التكنولوجيا أن هذه الادعاءات ستقود أي شخص «معقول» إلى استنتاج أن مخاطر حادث من منشأة توليد طاقة نووية منخفضة بدرجة يمكن معها تجاهلها. ولم تتقبل الجماهير هذه الادعاءات بصورة شاملة رغم أنها بدت منطقية.

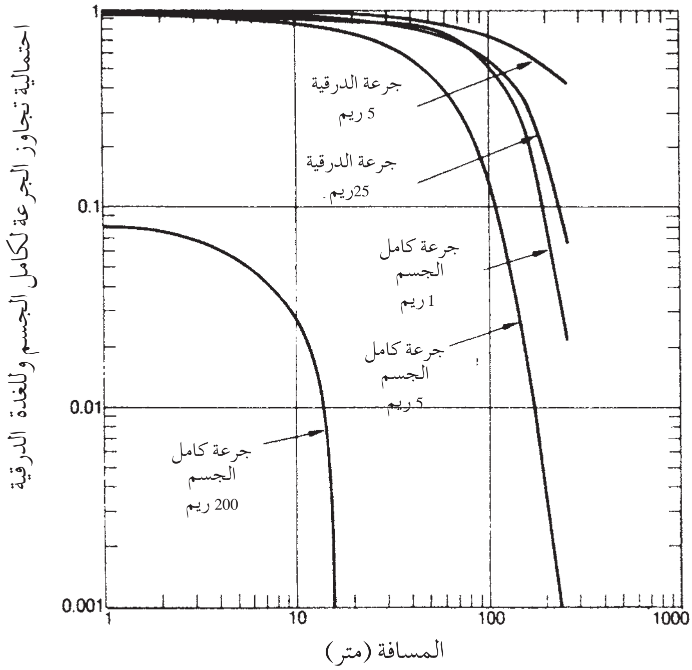
عواقب الحادث

كانت قد أدرجت في دراسة السلامة التي أعدها راسموسن تقديرات للإصابات في أنواع الحوادث المحتملة في حوادث مختلفة يمكن حصولها وتتراوح بين حادثة مرجعية وحتى أسوأ حادثة ممكنة. ومنشأ هذه الإصابات بالطبع هو التعرض للإشعاع فقط وليس لأي عامل مرافق آخر (وذلك لعدم وجود تأثيرات بعيدة المدى للصدمة أو الانفجار أو الحرارة من مفاعل منفلت من النوع المهدىء، مقارنة بقنبلة انشطارية). ويسبب التعرض للإشعاع بمستويات عالية إلى الموت أو المرض بسبب تأثيراته الجسدية الفورية[13]، ويمكن أن يسبب السرطان عبر مُدَد زمنية طويلة. وتشمل التأثيرات الجسدية وفيات فورية بسبب الجرعات الإشعاعية الضخمة.

هناك تأثيرات أكيدة في صحة الإنسان سببها الجرعات الإشعاعية فوق مستوى 30 ريم. والجرعات التي تتجاوز 100 ريم تسبب المرض الإشعاعي* (Radiation Sickness) ويعتبر التعرض لـ 200 ريم عتبة الجرعات المميتة. وتسبب الجرعات التي تتراوح بين 1000 و3000 ريم الموت خلال أسبوعين فيما يسبب التعرض إلى جرعة تزيد على 3000 ريم إلى الموت خلال ساعات. وقد لاحظ الطبيب النفسي روبرت ليفتون (1976) أنه بجانب الخطر الفعلي من التعرض للإشعاع فإن مجرد فكرة إمكانية التعرض كان لها أثر عميق في الناس. وقد وصف ليفتون «أعراض الخوف البدائية حول سلامة الجسم البشري عندما يهدده سم الإشعاع غير المرئي» (Weart, 1988). ويعتقد بعض المهندسين والعلماء أن الوقع السيكولوجي لاستخدام الطاقة النووية غير عقلاني، وحاولوا أن يبرهنوا على وجوب صرف النظر عنه عند إجراء مناظرات عن

* مرض الإشعاع أو التسمم الإشعاعي ينشأ عن تعرض حاد (جرعة واحدة كبيرة) للإشعاع وتظهر أثاره إمّا فوراً (إذا كان التعرض ذا شدة عالية) أو بعد فترة تتراوح بين ساعات وأيام اعتماداً على شدة التعرض. وأعراض المرض هي الغثيان والتقيؤ، كما توجد في بعض الحالات أعراض صداع وإعياء وضعف عام وهناك في الحالات الشديدة حمى وفقدان للشعر وإسهال. وتتراوح نسب الوفاة بين 10 في المئة لحالات التعرض دون المتوسط إلى 50 في المئة في حالات التعرض الشديد، وقد تصل إلى 100 في المئة في الحالات الشديدة جداً.

الطاقة النووية. وحتى إن كان هذا الوقع غير عقلاني فهل سيقرر وحده أهمية الموضوع؟ فإذا ما كان الناس يخافون شيئاً ما رغم عدم استناد الخوف إلى سبب علمي فهل يجب إجبارهم من قبل العلماء أو غيرهم في المجتمع على تحمل ذلك الخوف؟ وهل يجب أن تكون لمنطقية الخبير الكلمة النهائية في النقاشات الدائرة في المجتمع حول هذا الموضوع؟ هذه الأسئلة فلسفية أكثر من كونها تكنولوجية ولا تمتلك، كما سنرى في الملحق (ب)، أي إجابات ملائمة.



الشكل 7-13: الجرعة الإشعاعية المتوقعة مقابل المسافة عن الحادث النووي. [حقوق الطبع IEEE عام 1980].

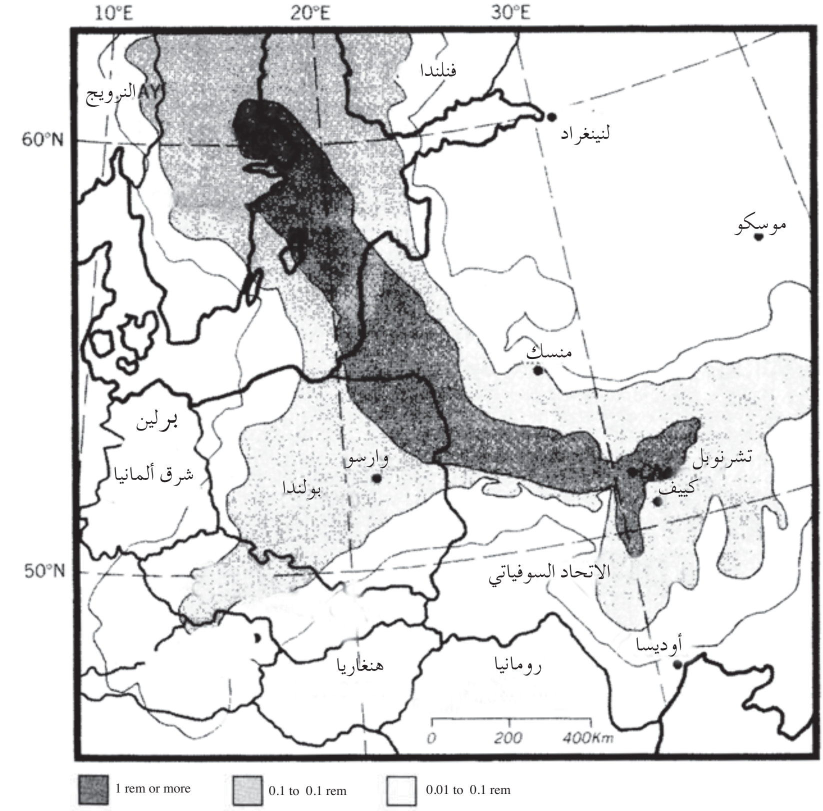
ويبين الشكل 7-13 نتائج حادث نووي رئيس على المنطقة المحيطة. والمنحنيات التي عرضت في دراسة راسموسن عام 1975 تبين انتشار جرعات الإشعاع تبعاً للمسافة الشعاعية عن المنشأ. والمنحنيات التي تخص الغدة الدرقية مهمة بصورة خاصة بسبب سرعة تأثر هذه الغدة بالنظائر المشعة المسببة للسرطان. لذلك فهي تستخدم كمؤشرات لما يجب أخذه عادة من إجراءات في أوقات الطوارئ بالنسبة إلى السكان. ورغم أن هذه المنحنيات قد جرى تقديرها قبل التجربة الفعلية في تشرنوبل إلا أنها وفرت صورة جيدة للجرع التي قد يطلقها مفاعل معطوب. أما المعلومات الفعلية عن الحادث (الشكل 7-14) فتبين جرعات الغدة الدرقية من مستوى 1 ريم أو

أكثر. وهي تمتد لمسافة 1000 ميل تقريباً. وتشير معلومات أخرى أكثر تفصيلاً عن تشرنوبل إلى أن الناس غير المحميين الذي يعيشون على بعد 50 ميلاً شمال غرب منطقة الحادث كانوا قد استلموا جرعة تراكمية في الدرقية تبلغ 30 ريم عبر 6 أيام بعد الحادث.

إن إمكانية الانتشار السريع للإشعاع من موقع حادث نووي قد أثارت كثيراً من النقاشات حول مسألة إجلاء السكان العام.

لذلك تبنّت NRC بعد حادثة (ثري مايل آيلاند) قاعدة تتطلب حماية الجمهور بما في ذلك احتمالية الإجلاء ضمن نصف دولة يبلغ 10 أميال. لكن المسافة كانت عرضة للجدل. فمن ينتقد هذه الصناعة يريد أن يطيل نصف القطر ليصل 20 ميلاً أو أكثر. في حين يناقش مؤيدو الصناعة مسافة 10 أميال ويعتبرونها كبيرة من غير داعٍ.

وحتى في حالة إجراء إخلاء فقد قدرت مجموعة دراسة راسموسن وقوع إصابات كبيرة في أسوأ حادث ممكن. وقد تخيلوا حصول 2300 وفاة وهو ما اعتبره النقاد رقماً محافظاً جداً. وقد دعم احتساب آخر بعد ذلك (Washington Post, 1 Nov 1982) أجري لحساب NRC ما قاله النقّاد. وادعى هذا الاحتساب أن الوفيات قد تصل عشرات الآلاف. ووفقاً لتقارير سوفياتية مبكرة عن حادثة تشرنوبل، كان هناك نحو 30 حادث وفاة بعد الحادث مباشرة بسبب التعرض المباشر للإشعاع عند وقت الحادث. ومنذ ذلك الحين تُعزى نحو 6000 حالة وفاة بصورة مباشرة إلى التعرض الحاد للإشعاع وغالبيتهم من بين العاملين على تنظيف الموقع (Bulletin of the Atomic Scientist, May/ June 1996). وقد ازدادت نسبة حدوث سرطان الغدة الدرقية بين الأطفال في المنطقة في فترة عشر سنوات بعد الحادث مئة مرة (N. Y. Times, 21 Nov 1995). وتستمر دراسة التأثيرات الصحية وتتحدث بعض التوقعات عن أكثر من مئة ألف وفاة قبل أوانها في العقود القادمة بسبب ذلك التعرض للإشعاع. وقد أُدرك في وقت مبكر من البرنامج النووي إمكانية أن يسبب حادث نووي رئيس مطالبات قانونية هائلة كتعويض عن فقدان الحياة والمرضى وتضرر الممتلكات التي يتحملها مشغل المحطة النووية. ومع وجود هكذا تصور، كان واضحاً أيضاً أن القليل فقط من شركات تجهيز الكهرباء المملوكة من القطاع الخاص ستختار الطاقة النووية، لأن حجم التعويضات يمكن أن يؤدي بها إلى الإفلاس. لذا كان هناك خلال الفترة الأولية للترويج للطاقة النووية في عقد الخمسينيات حافز قوي لإزالة هذا العائق، وهذا ما أدى إلى تشريع قانون برايس - أندرسون الذي شرّعه كونغرس الولايات المتحدة عام 1957.



الشكل 7-14: تقديرات جرعة الدرقية التي جرى استنشاقها بعد أربعة أيام من حادث تشرنوبل.
طبعت بإذن من Bulletin of the Atomic Scientists وهي مجلة للعلوم والعلاقات الدولية، حقوق الطبع 1986 من قبل Foundation for Nuclear Science, 6042 South Kimbark Avenue, Chicago, Illinois 60637.

كان قانون برايس ـ أندرسون موضع جدل منذ تشريعه وكان الجدل يتجدد كل مرة يرسل فيها القانون إلى الكونغرس لتمديده. وقد وضع القانون جزءاً من المسؤولية القانونية على مالك المحطة النووية تاركاً الجماهير عرضة لخسائر كبيرة غير معوضة. وقد حدد الإجراء المسؤولية على المشغل بستين مليون دولار في الأصل، على أن تبقى حكومة الولايات المتحدة مسؤولة عن مبالغ إضافية تبلغ كحد أعلى خمسمئة مليون دولار. وكان حجم التعويضات المتوقعة حتى ذلك الوقت يبلغ ثلاثين مرة ذلك المبلغ. هذا وقد جرى تمديد القانون ثلاث مرات أولها عام 1965 ثم في عام 1975 وآخرها كان عام 1988 رغم أن القصد الأولي كان يتعلق بقانون وقتي. وما زالت المسؤولية القانونية المترتبة على أي

مشغل بمفرده، لا تتجاوز المبلغ الأصلي أي ستين مليون دولار مع تحمل صناعة الطاقة النووية مسؤولية إضافية محددة بسبعة مليارات دولار. ورغم أن هذا المبلغ يفوق المبلغ الأصلي بأكثر من عشرة مرات إلا أن النقاد يشيرون إلى أن الأضرار من حادث رئيسي قد تتجاوز هذا المبلغ بدرجة كبيرة.

خلاف علني

الخبراء يختلفون

أصبح العديد من أعضاء المجتمع التكنولوجي بدءاً بالسبعينيات، وقبل نشر تقرير WASH 1400، أكثر اهتماماً بموضوع سلامة المفاعلات النووية. وكان هناك خوف متنامٍ من أن معايير سلامة المفاعلات النووية أصبحت ضحية الترويج للتوسع في الطاقة النووية (Ford, 1982).

أجريت إثر نشر مسودة WASH 1400 عدة دراسات نقدية للنتائج. وأشرفت الجمعية الفيزيائية الأميركية (APS) على أكثرها شهرة: مجموعة APS لدراسة سلامة مفاعلات الماء الخفيف. وانتقدت اللجنة التي تألفت من فيزيائيين محترفين الطريقة وما غُض النظر عنه ونتائج تقرير WASH 1400. فقد قالت مثلاً أن دراسة راسموسن تغاضت عن الإمكانية الكبيرة لحالات الفشل في الوضع الطبيعي[14].

وهاجمت الصناعة النووية إضافة إلى وكالة الطاقة الذرية ووكالة التنظيم الوطنية وبضعة علماء متميزين، المنتقدين. لكن النقاش الذي وضعه علماء بارزون ضد بعضهم بعضاً أصاب الجمهور والعديد من المسؤولين المنتخبين بالإرباك. وتساءلوا: كيف يمكن في النهاية حدوث اختلاف حول قضية تتعلق بحقائق علمية؟ ومع ذلك لم تكن هناك حقائق علمية متوفرة ولم يكن هناك اتفاق يضع حلاً لقضايا التخمين والاحتمالات. وللخبراء كما سنبين في الملحق B حدودٌ لإمكانياتهم – وتلك نقطة تم إظهارها بجلاء

14 ـ في حالات الفشل في الوضع الطبيعي تعتمد حالة واحدة (أو فشل واحد) في شجرة الأحداث على حالة أخرى وهي بذلك تخالف افتراض الاحتمالات المستقلة (أو القابلة للضرب). ويفترض أن نظم السلامة المهندسة قد اتخذت احتياطات شديدة التدقيق لتوكيد استقلالية المهمة لكل خطوة، ورغم ذلك فإن حادثة احتراق عرضية في محطة (براون فيري) النووية في 22 آذار/ مارس 1975 كشفت النقاب عن سلسلة اعتمادات في حالة الوضع الطبيعي للمنشأ بما غير احتماليات شجرة الأحداث بصورة شديدة الأثر.

واضح للعامة في تبرير الفشل الفعلي للتكنولوجيا النووية في حادثي ثري مايل آيلاند وتشرنوبل.

ثري مايل آيلاند (TMI)

وقع حادث خطير في تاريخ الطاقة النووية يوم 28 آذار/ مارس 1979 عندما فتح أحد صمامات تصريف الضغط العالي في المفاعل رقم 2 في محطة ثري مايل آيلاند النووية قرب مدينة هاريسبورغ في بنسلفانيا. ورغم أن انفتاح الصمام كان «حادث استهلاك» في توالي الحوادث في ثري مايل آيلاند إلا أنه يشير إلى مشكلة أساسية. فقد بدأ توالي الأحداث كما يبين تحقيق رسمي بسبب خطأ بشري. فقد ترك صمام تغذية ماء رئيسي مقفلاً بصورة خاطئة بعد صيانة روتينية في اليوم السابق. وكان النقاد قد حذروا قبل سنوات من العواقب التي لا يمكن تجنبها للخطأ البشري.

لقد اقترف المشغلون أخطاء جسيمة في ثري مايل آيلاند، وقبل إدراكهم لها وتصحيحها كان قلب المفاعل على وشك الإنصهار. ورغم عدم وجود إصابات مباشرة وسريعة إلا أن آثار الحادث في ثري مايل آيلاند كانت كارثية. فقد أصيب قلب المفاعل بدمار شديد وأصبحت كامل المساحة ضمن بناية الاحتواء مشبعة بالإشعاع إلى درجة تمنع وصول الإنسان اليها، وأعاقت استخدام أي وسيلة لإصلاحه. وقد أوصلت كلفة التنظيف الشركة المشغلة (وهيGeneral Public Utilities) إلى حد الإفلاس تقريباً. وكانت كلفة تنظيف المحطة وإصلاحها قد قدرت بنحو مليار دولار. وكان على الشركة المشغلة خلال تلك المدة شراء القدرة الكهربائية من شركات مجاورة بكلفة مضافة إلى كلفة التوليد لديها.

أظهرت مراجعة نظام السلامة في ثري مايل آيلاند[15] أن الأخطاء البشرية كانت بأهمية حالات الفشل الميكانيكي على الأقل. وقد عُزيت أسباب الخطأ البشري من قبل المشغل أثناء الحادث إلى التدريب غير الكافي وهو ما يمكن أن يسمى «الفشل المؤسساتي». ويؤكد منتقدو التكنولوجيا مع ذلك أن الخطأ البشري يمكن أن يصل إلى حد أدنى

15 ـ كانت اللجنة التي شكّلها الرئيس كارتر عن الحادث في ثري مايل آيلاند تحت رئاسة جون كيميني (John. G. Kemeny) (الرئيس السابق لكلية دارتموث) ودعيت باسم لجنة كيميني. وقد استقصت أسباب الحادث وقدمت توصيات لمنع حدوثه مستقبلاً.

لا يمكن تقليله وإن هذا الحد سيقرر أيضاً الحدود الدنيا لاحتمالية وقوع الحادث في منشأة نووية.

وما يتوجب توكيده أن هذا الحادث كان من النوع الذي يمكن أن يحصل حتى إذا ما جرى إيقاف فجائي ناجح (ويدعى هذا الإيقاف Scram وذلك عند إدخال قضبان التحكم ليصبح المفاعل في حالة دون الحرجة). وتستمر الحرارة بالتولد حتى بعد إيقاف التفاعل التسلسلي ويسبب افتقاد المبرد إلى ارتفاع درجات الحرارة لقلب المفاعل. وهذا النوع من الحوادث (المسمى LOCA) يختلف بصورة متميزة عمّا حدث في تشرنوبل بعد ذلك.

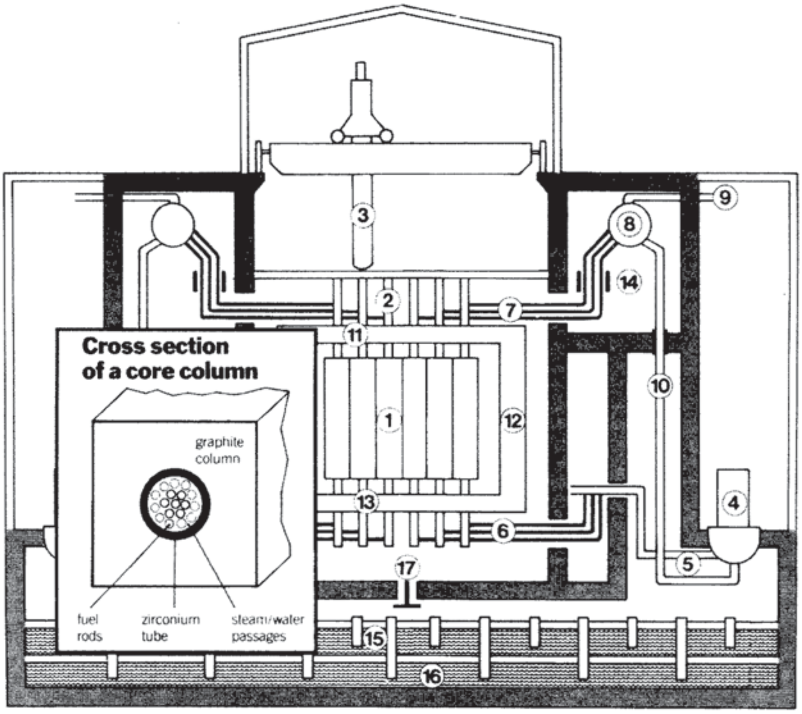
تشرنوبل

لقد دعيت حادثة تشرنوبل بحالة المفاعل المنفلت. والمترتبات على هذه التسمية لا تقتصر على أن التفاعل التسلسلي لم يجرِ إيقافه بل إن حالة فوق الحراجة حدثت في قلب المفاعل مسببة تزايداً سريعاً في التفاعل التسلسلي.

ولم يقتصر اختلاف حادثة تشرنوبل عن ثري مايل آيلاند في حالة حراجة المفاعل، بل تعدت ذلك إلى السبب الأصلي. ففي حين كان الحادث في ثري مايل آيلاند قد بدأ خلال تشغيل اعتيادي بدأ الحادث في تشرنوبل خلال اختبار خاص للمنشة. وقد نُسب سبب الحادث بصورة واسعة إلى حالة المفاعل غير الروتينية وغير الحكيمة التي عُمِل بها أثناء الاختبار. ومع ذلك، وكما سنرى، فإن أخطاء المشغلين وسوء تقديرهم اللذين حدثا يمكن أن يحدثا في أماكن أخرى.

لقد جرى كلام مطول عن تصميم مفاعل تشرنوبل وهو تصميم نمطي كان متبعاً في عدد من المحطات النووية العاملة في أنحاء الاتحاد السوفياتي السابق، ويدعى هذا التصميم باسم (RBMK) (انظر الشكل 7-15). والحقيقة أن لهذا التصميم تاريخ تعتريه المشاكل. وتبعاً لتقارير سابقة فقد عانى المهندسون صعوبات في التحكم عند تركيزات خطيرة تنتج من تفاعلات في RBMK[16].

16 ـ يبلغ حجم قلب مفاعل RBMK (30 متراً ـ 40 متراً) وفيه كمية كبيرة من المادة الانشطارية في قضبان وقود يبلغ عددها 1661. ومن الممكن لأحد مناطق القلب أن تصبح فوق الحرجة لتنشىء بقعاً ساخنة. إن التحكم في الحرارة المفرطة أو الانصهار الجزئي في مثل هذه المنطقة يمكن أن يكون أصعب من حالة منتظمة عبر كامل أبعاد قلب مفاعل أصغر.



1 ـ قلب المفاعل ويتألف من أعمدة كونكريتيه (انظر الشكل الداخلي لمنظر مقطعي).

2 ـ قنوات الوقود (قضبان التحكم).

3 ـ ماكنة تزويد الوقود.

4 ـ مضخات التدوير الرئيسة

5 ـ أنابيب توزيع ماء التبريد

6 ـ أنابيب إدخال ماء التبريد

7 ـ أنابيب إخراج الماء والبخار

8 ـ أوعية فصل البخار

9 ـ أنابيب البخار (إلى التوربينات)

10 ـ خطوط إعادة الماء (من أوعية البخار إلى مضخات التدوير)

11 ـ الدرع البيولوجي العلوي

12 ـ الدرع البيولوجي الجانبي

13 ـ الدرع البيولوجي السفلي

14 ـ نظام اكتشاف فشل الإكساء

15 ـ وعاء الماء العلوي

16 ـ وعاء الماء السفلي

17 ـ صمام تصريف الضغط

الشكل 7-15:

مفاعل تشرنوبل. منظر مقطعي. لاحظ أن ماء التبريد يجري حول قضيب الوقود ضمن أنبوب محتوى داخل كتلة المهدئ الغرافيتي.

كما في الشكل الطبيعي

معاد طبعها بسماح من *Bulletin of Atomic Scientists* وهي مجلة عن العلم والشؤون الدولية. حقوق النشر لعام 1986 محفوظة.

by the Educational Foundation for Nuclear © Science, 6042 South Kimbark Avenue, Chicago, 1986 Illinois 60637.

يختلف مفاعل تشرنوبل عن أنواع المفاعلات في الولايات المتحدة في أمرين. فهو يستخدم الغرافيت كمهدئ للتفاعلات في القلب (1)، ويستخدم القلب نفسه أنابيب مضغوطة بدل وعاء ضغط واحد. ويبين الشكل الداخلي في الجهة السفلى اليسرى، مقطعاً لواحد من 1661 أنبوباً غرافيتياً يحتوي على قضبان الوقود من اليورانيوم. ويقوم نظام عالي التعقيد لقضبان الوقود ببدء تشغيل التفاعل النووي ويسيطر عليه ويوقفه (2). وتستطيع ماكينة خاصة (3) تزويد المفاعل بالوقود أثناء عمله، وذلك بإدخال قضبان الوقود في أعمدة الغرافيت. ويخزن الوقود المستنفد في أحواض (كما في الولايات المتحدة) غير مبينة.

ويسخن التفاعل المسيطر عليه في حالة التشغيل الاعتيادي الماء الذي تدفعه مضخات التدوير الرئيسة (4)، من خلال العديد من أنابيب التوزيع (5) إلى مداخل أنابيب التبريد الضيقة (6)، ومن هناك إلى ممرات الماء/ البخار ضمن أنابيب الغرافيت. (انظر الشكل الداخلي). ويجري التحكم بالحرارة التي يولدها التفاعل النووي بواسطة ماء التبريد، وهذا يحول بعض الماء إلى بخار. ويسير هذا المزيج للماء/ البخار خلال أنابيب منافذ التبريد (7) إلى صهاريج تقوم بفصل البخار عن الماء (8). ويمر البخار من الصهاريج خلال أنابيب (9) إلى توربينات القدرة التي تولد الكهرباء. أما الماء المفصول في الصهريج فيجري خلال أنابيب إلى مضخات التدوير، حيث تبدأ دورة الماء ثانيةً.

وتحيط سلسلة من الدروع البيولوجية (11، 12، 13) بقلب المفاعل ـ وتدعى بهذا الاسم لأنها تحمي العاملين من الإشعاع –. ويملأ الحيز داخل الدروع بغاز خامل. ويعتبر نظام استقصاء فشل الإكساء (14)، أداة وقاية أخرى لاكتشاف أي تسرب لمادة مشعة من الأنابيب المعدنية (الإكساء) حول قضبان الوقود في ماء التبريد. وإذا ما تمزق أحد أنابيب التبريد الكبيرة (الموضوعة داخل غرفة ذات جدران من الكونكريت) إضافة إلى ذلك، فإن البخار المتسرب سيتكثف في الأحواض (15، 16). ويتمكن البخار إذا انطلق داخل غرفة المفاعل من المرور خلال صمامات تصريف الضغط (17) ويتكثف في الأحواض السفلى أيضاً.

وتبرز إمكانية التحكم الضعيف جزئياً بسبب مزج الغرافيت كوسط للتهدئة مع الماء كوسط للتبريد. ويؤدي هذا المزج إلى تأثير تغذية مرتجعة إيجابي على التفاعلية عندما تسبب فورة في الحرارة إلى فجوات ضمن ماء التبريد يملؤها البخار. وهذا يحدث لأن ماء التبريد في RBMK يعمل كممتص للنيوترونات أكثر من عمله كمهدئ. ويمتلك مزيج الوقود النووي في هذا التصميم تخصيباً أوطأ (نحو 2 في المئة من U^{235})مقارنة بالتصميم الغربي نوع LWR (نحو 3 في المئة U^{235}) ويعتمد على خواص التهدئة الفائقة للغرافيت لإنجاز التفاعل التسلسلي. وهكذا فحين تحصل فجوة في ماء التبريد تتسع لنسبة أكبر من النيوترونات باختراق الغرافيت المهدئ وصولاً في النهاية إلى قضيب وقود آخر جاهز للانشطار. والتأثير الكلي هو حصول فورات من التفاعل

التسلسلي وإنتاج الحرارة ما يؤدي إلى زيادات تالية في التفاعل التسلسلي. والمفاعل الذي يمكن أن يحدث ذلك فيه يقال إنه يمتلك معامل فجوات إيجابي (Positive Void Coeffecient).

ويعرف عن مفاعل RBMK أنه عرضة لمستويات عالية من التفاعلية تحدث عند نقطة تكون فيها تلك المنطقة من القلب في حالة «فوق الحرجة» في حين تبقى بقية مناطق القلب في حالة دون الحرجة. وقد أُدخل في التصميم بعض قضبان التحكم لتحقيق استقرارية في هذه الفورات الموضعية من التفاعلية وبخاصة على طول قضبان الوقود البالغ 7 أمتار في القلب.

وللغرافيت نفسه بعض الخواص غير المرغوبة عند استخداماته في درجات حرارية عالية. فهو أولاً يحترق في درجة حرارة تبلغ 700° سيلزيوس عندما يتعرض للهواء. وعادة ما تكون درجة حرارة التشغيل للغرافيت في حدود 600° سيلزيوس فيما يكون قلب المفاعل بمجمله مملوءاً بغاز خامل بدون أن يغير ذلك في إمكانية الاحتراق. إضافة إلى ذلك فإن مزج البخار والكربون قد ينتج منه هيدروجين وأول أكسيدالكربون (وكلاهما قابل للاحتراق). وتعزز إمكانية توليد الهيدروجين بواسطة تفاعل تأكسدي للبخار مع أنابيب الزركونيوم في قنوات قضبان الوقود (انظر الشكل الداخلي في الشكل 7-15) إذا ما ارتفعت درجة الحرارة إلى ما فوق درجة 1000 مئوية.

ومن سخرية الأقدار أن كارثة تشرنوبل كانت نتيجة لاختبار خاص أجري لتحسين استجابات السلامة في الطوارئ. وكان المشغلون في الاختبار الذي كان السبب في بدء الكارثة يهدفون بالطبع إلى تحقيق أهداف الاختبار بدرجة جعلتهم يخالفون قواعد التشغيل السليم وكان عدد منها يُعدّ من المحرمات الصارمة. وكان هدفهم بصورة عامة هو اختبار إمكانية المولد التوربيني في تزويد القوة الكهربائية إلى المحطة لبرهة قصيرة تلي قطع تجهيز البخار من المفاعل. وكان تجهيز الكهرباء ضرورياً في مثل هذه الحالة لاستثارة نظام الطوارئ لتبريد المفاعل وبقية فعاليات السلامة المهندسة في حالة فقدان المبرد (LOSA). وهذه هي المفارقة الغريبة في هذا الحادث.

في سياق إجراء الاختبار أوصل المشغلون مفاعل RBMK إلى حالة تشغيلية واطئة القدرة جداً، وتأثير الفجوات الإيجابي في هذه الحالة أوضح مما هو عليه في حالة

القدرة الكاملة. إضافة إلى ذلك قاموا عند مواجهة هبوط لحظوي في الفعالية بسحب أعداد من قضبان التحكم أكثر من العدد المعتمد ليبلغوا الحالة المطلوبة في الاختبار. وقام المشغلون أخيراً بتعطيل مهمتين في نظام السلامة وهما الإيقاف الأوتوماتيكي للمفاعل ونظام تبريد القلب في حالة الطوارئ. لذلك لم يعد المفاعل يعمل بعد تعطيل معظم تدابير السلامة فيه بحالة مستقرة.

وقد استنتج تحليل لاحق أجرته مجموعة من خبراء المفاعلات جمعتهم الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) في فيينا، حدوث انحرافٍ فجائي حرج (حيث يتزايد التفاعل التسلسلي ويخضع للتحكم بواسطة النيوترونات الفورية)، ما سبب انفجاراً للبخار مزّق قلب المفاعل وفتحه. فانهار سقف بناية الاحتواء، ما أطلق كميات هائلة من ركام المخلفات أو النفايات الإشعاعية في الهواء[17].

كانت كمية المادة المشعة المطلقة أكبر مما توقعه خبراء السلامة النووية إذ قاربت 100 ميغاكيوري (MCi). وشملت نظائر اليود والتيليريوم والسيزيوم المتطايرة التي نقلت إلى مسافات بعيدة عن موقع الحادث. إضافة إلى ذلك، جرى اكتشاف كميات أكبر من المتوقع من النظائر الأثقل كالسترونتيوم والبلوتونيوم، وقد عزيت كمية وتركيب الغبار النووي المتساقط (Fallout) إلى طبيعة الحادث العنيفة. أما حادث ثري مايل آيلاند فقد نتج منه ما يقارب 15 كيوري فقط لأنه كان من نوع «انصهار القلب»، وجرت السيطرة عليه واحتواؤه. وحتى لو لم يجرِ الاحتواء فإن الانبعاثات من النوى المشعة لم تكن لتبلغ جزءاً مما أطلق في تشرنوبل.

ويصوّر الشكل 7-14 الجرعة الإشعاعية التي تلقاها الناس في الجوار. فقد جرى إخلاء نحو 135000 شخص من المنطقة المجاورة للانفجار تماماً (في نصف قطر — 30 كم)، وقدر أن نحو 25000 شخص أخذوا جرعات إشعاعية تبلغ 35000 ريم على الأقل. وجرى فحص الخضروات ومنتجات الألبان في كافة أنحاء أوروبا وصودرت كميات كبيرة منها. وربما جعل التلوث بالنظير سيزيوم ^{137}(R) ذا عمر النصف البالغ 30 عاماً المنطقة المجاورة لتشرنوبل غير قابلة للسكن لعقود قادمة.

17ـ إن الاستنتاجات حول تتابع وسبب الحادث كانت ويجب أن تبقى متحفظاً عليها إلى حد ما. فالعلماء لم يتمكنوا من الكشف على ما تبقى من محطة تشرنوبل عن كثب بسبب مستويات الإشعاع العالية جداً. وقررت السلطات السوفياتية بعد الحادث بفترة وجيزه أن تقبر المفاعل مما جعل تفحصه أمراً مستحيلاً.

وبدا الخبراء في أوروبا والولايات المتحدة، بعد الحادثة مباشرة يناقشون ما يعنيه الحادث بالنسبة إلى مستقبل الطاقة النووية. وأقر أنصار الطاقة النووية[18] بأن مثل هذا الحادث لا يتوقع حدوثه في أحد مفاعلات الولايات المتحدة وأنه يتفرد في مفاعلات من نوع RBMK فقط. ورغم أن هذه القناعات كانت صحيحة بالنسبة إلى مفاعلات القدرة التجارية في الولايات المتحدة إلا أنه سرعان ما أشير إلى أن بعض المفاعلات المهدأة بالغرافيت كانت تستخدم للإنتاج العسكري للبلوتونيوم (انظر الفصل الثامن). فضلاً عن ذلك لم يتقبل نقاد الطاقة الذرية الحجج حول الاختلافات بين المفاعلات الأميركية والسوفياتية، مع الأخذ بنظر الاعتبار أن بعض أوجه تشغيل المفاعلات ذات طبيعة عامة تشمل كافة الأنواع.

وعليه فإن جميع مفاعلات القدرة العاملة في وقتنا الحالي تشترك في ما يأتي:

1- التفاعلات التسلسلية والحركيات (Chain Reaction and Kinetics) بما يجعل السيطرة مهمة تتطلب براعة ودقة مع وجود فرصة دائمة لانحرافات قدرة كبيرة بما في ذلك حالة الحراجة الفورية وهو أمر بعيد الحدوث إنما لا يمكن إلغاؤه كلياً.

2- الحاجة المطلقة للتخلص من حرارة المفاعل أثناء عمله أو بعد إيقافه مباشرة. وهذا يفاقم تهديد فقدان ماء التبريد LOCA .

3 - إمكانية حدوث خطأ بشري وما يحمل معه من احتمالية لا يمكن تلافيها لا سيما إذا اقترنت مع تكنولوجيا لا تتسامح مع الخطأ.

لقد جرى التعامل مع بعض هذه الخواص التكنولوجية من قبل الصناعة. فمفاعلات المستقبل مثلاً سيمكن تصميمها لتكون بطبيعتها الأساسية أكثر أماناً في ما يخص فقدان التبريد أو انصهار القلب. وسيغمر المفاعل بجملته في مثل هذه التصاميم

18 ـ في الأسابيع التي تلت حادثة تشرنوبيل نشرت مجموعات الصناعة النووية مثل منتدى الصناعة النووية ومعهد إديسون للكهرباء والجمعية النووية الأميركية إفادات للجماهير تدعي أن أنظمة سلامة المنشآت النووية الأميركية تتفوق على السوفياتية. وما عنته هذه الإفادات هو أن مثل هذه الحادثة لا يمكن أن تحدث في أميركا وقد أكد البعض ذلك أكثر من الباقين. غير أن آراء الخبراء من أمثال علماء مختبر بروكهافن القومي ووكالة الطاقة الذرية الدولية اتسمت بالحذر إزاء هذه الإستنتاجات. أما آراء مفوضي وكالة التنظيم النووي الوطنية فقد تباينت (انظر: The New York Times, 19 May 1986).

بحلول التبريد في جميع الأوقات بحيث يكون تبريد الطوارئ دائم الوجود ، ويمكن أن يجري بصورة طبيعية أثناء عملية النقل الحراري. ويملأ حوض التبريد في أحد هذه التصاميم المقترحة والمدعو مفاعل PIUS (Process Inherent Ultimately Safe) بماء مشبع بأملاح البورون الذي يعمل كمادة امتصاص قوية للنيوترونات في حالة حدوث تمزق نظام المبرد/المهدئ الاعتيادي الحاوي على الماء النقي. وحتى إذا ما جرى تبني هذه التصاميم كما هو متوقع في المستقبل، فستبقى مسألة سلامة المفاعل قائمة من دون شك، لأن المفاعلات من نوع ثري مايل آيلاند وتشرنوبل ما زالت قيد العمل. لقد كانت الاستثمارات العالمية في المفاعلات هائلة، ومن غير المتوقع أن يجري التخلص من المفاعلات العاملة منها الآن لعقود قادمة.

لقد اتخذت الصناعة في الولايات المتحدة خطوات للتقليل من احتمالية حدوث الخطأ البشري وذلك من خلال إقامة برامج لتدريب المشغلين في معهد تشغيل منشآت الطاقة النووية (INPO). وقد أسس هذا المعهد من قبل الصناعة بعد حادثة ثري مايل آيلاند ويجري فيه تدريب المشغلين حول استجابتهم لمختلف أنواع المواقف الطارئة الافتراضية باستخدام محاكيات (Simulators) مفاعلات متطورة. ورغم أن هذا التدريب سيحسن من دون شك من استجابات السلامة في المنشآت العاملة إلا أن إلغاء الخطأ الإنساني بصورة كلية أمر غير ممكن. ويقر بعض المحللين أن الحوادث بسبب خطأ المشغل ليس فقط أمراً يتعذر تجنبه مع أنظمة معقدة، بل هو متوقع في مسار الأحداث، أي إن ذلك يعتبر من «الحوادث الاعتيادية» (Perrow, 1984, and Tenner, 1996).

الإخلاء في حالة الطوارئ

أثارت حادثة ثري مايل آيلاند وبشكل دراماتيكي الحاجة إلى إدارة طوارئ لسكان المناطق المجاورة للمنشآت النووية. وقد آثار بعض الخبراء وبعض وسائل الإعلام في حينه أسئلة حول الإخلاء وحول الحاجة إلى توفير حبوب لوقاية الغدة الدرقية[19] إذا ما تسربت مواد مشعة. ومع التسرب الهائل للإشعاع في حادث تشرنوبل عام 1986 أصبح الإخلاء بالطبع ذا ضرورة واضحة.

وقد طالبت وكالة التنظيم النووي (NRC) بوضع خطط للطوارئ لكافة مشغلي

19 ـ تمنع حبوب اليود امتصاص اليود المشع في الغدة الدرقية من مصادره في الماء والمواد الغذائية الملوثة إشعاعياً.

المنشآت النووية وتلك التي في مرحلة التخطيط أيضاً. وأدت صياغة مثل هذه الخطط (وهي لم تكن مطلوبة عند إجراء دراسة (WASH 1400)* إلى بروز نقاشات عامة وساخنة في عدد من مواقع المنشآت النووية. وفي حالة محطة شركة شورهام في ولاية نيويورك مثلاً عارضت الجماهير والقادة السياسيون خطط إخلاء (لموقع لونغ آيلاند لايتنغ كومباني) على أساس أن الإخلاء بطريقة سليمة مستحيل بسبب الطبيعة الجغرافية للونغ آيلاند (انظر الصفحة التالية: شورهام وسبب إلغاء محطة نووية). ونشأ موقف مشابه في حالة محطة سيبروك الواقعة على شريط ضيق من الأرض على ساحل نيوهامبشاير وعلى حدود ماساشوسيتس.

شورهام: لماذا أُلغيت محطة نووية

قد تكون صياغة خطط إخلاء آنية لمحطة قدرة نووية أمراً بالغ الصعوبة. فقد برهن وضع خطة مقبولة في حالة محطة شورهام على لونغ آيلاند في ولاية نيويورك، على كونه مستحيلاً. ولم يسمح، نتيجة لذلك للمحطة التي كلفت مليارات من الدولارات أن تبدأ بالعمل.

وكان قد خطط لإنشاء محطة شورهام في عقد الستينيات من قبل شركة لونغ آيلاند لايتنغ (LILCO) وهي شركة يملكها مستثمرون. وبدأ بناء المحطة التي تبلغ قدرتها الكلية 810 ميغاواط عام 1970. غير أن عملية البناء كانت كارثة إدارية ومالية وكلفت عند إكمالها 5.5 مليار دولار واستغرق البناء فترة عشرين عاماً.

قاد البيئيون المعارضة الجماهيرية لشورهام في البدء. وتبدل ذلك مع الحادث في ثري مايل آيلاند عام 1979. وبدأت مظاهرات واسعة النطاق ضد شورهام، وجرى في العام التالية تشكيل ائتلاف من معارضي شورهام وأعطي حق شرعي للتدخل في حلقات السماع التي تعقدها وكالة التنظيم النووي (NRC).

لكن حادثة ثري مايل آيلاند كان لها نتيجة مختلفة أدت في النهاية إلى إلغاء شورهام. بعد الحادث طلبت NRC خطط إخلاء لمنطقة نصف قطرها عشرة أميال حول المحطة النووية. ولا يمكن لشركة كهرباء، على أي حال، فرض خطة على

* يُستغرب من عدم وجود خطة طوارئ في حالة منشأة شديد الخطورة مثل محطة قدرة نووية. ووجود هذه الخطة حتى في حالة صناعة أقل خطورة بكثير من الصناعة النووية كالنفط مثلاً أمر بديهي وقد يتخطى الواقع ذلك إلى إجراء تدريبات دورية عليها للعاملين في المنشأة.

المجتمع. وكان يجب بدل ذلك صياغة الخطة بتعاون ومشاركة الحكومة المحلية وحكومة الولاية الموكلة إليهما سلطة شرعية لحماية الصحة والسلامة. و في أيار/ مايو 1981 وعند إكمال المحطة بنسبة 85 في المئة طلب من مشرعي مقاطعة صفولك وهم الجهة الحكومية التي تمتلك السيادة على منطقة المحطة ترخيص خطة الإخلاء.

لكن ذلك لم يتحقق ونمت المعارضة، بدل ذلك، واحتلت خطة الإخلاء فجأة مركز النقاش. وبسبب كون لونغ آيلاند جزيرة طويلة وضيقة، حيث أوقعت منطقة الخطر ذات البعد المتراوح بين 10 و20 ميلاً فعلياً كافة السكان الذين يعيشون شرق المحطة بشرك. الأكثر من ذلك لم يكن نظام الطرق في مقاطعة صفولك ملائماً للاخلاء الواسع. وسرعان ما استنتج المسؤولون الحكوميون أن الإخلاء ببساطة غير ممكن، وأعلنت سلطات ولاية نيويورك ومقاطعة صفولك عام 1983 أنهما لن يشاركا في صياغة خطة الإخلاء لمحطة شورهام.

غير أن قلق شركة (LILCO) كان في الوقت ذاته يتزايد حول تشغيل محطتها شبه المنجزة. وقررت عندما ووجهت بمعارضة حكومية أن تدرب مستخدميها على إجراء عمليات الإخلاء، وطلبت من حكومة الولايات المتحدة حذف طلب مشاركة سلطة الولاية والسلطة المحلية. وفي عام 1988 وافق الرئيس ريغان (رغم أن أمره الإداري آثار أسئلة دستورية). وقامت (LILCO) إثر ذلك بإجراء تمرينين (شملا مستخدميها فقط ولم يشملا عامة الجماهير). قالت الشركة والحكومة الاتحادية على أثرهما أن التمرينين كانا ناجحين. ومع ذلك لم يتفق على هذا التقييم. وقد عارض ذلك أحد مسؤولي الطوارئ الحكوميين بشدة أدت به إلى الاستقالة.

وبدأ مسؤولو (LILCO) رغم تحديهم مسؤولي الولاية والمسؤولين المحليين، دراسة طريق مختلفة. فقد كانت الشركة وهي محملة بأعباء بناء شورهام على حافة الإفلاس وفقدت التأييد الشعبي. وبدا أن الشركة كانت راغبة في التخلي عن المحطة إذا ما كانت الشروط مقبولة.

غير أن الشروط آثارت جدلاً أيضاً. إذ أرادت LILCO استعادة معظم المبالغ التي استثمرتها من خلال زيادة الأجور. وفي حين اختلف المعارضون في مطالبهم طالب بعضهم بحل LILCO ذاتها. وكان التحكم في إنتاج الطاقة الكهربائية وتوزيعها

سيعطى إلى سلطة من القطاع الحكومي. وقدمت في الحقيقة مجموعة دعت نفسها (سلطة الطاقة في لونغ آيلاند) عرضاً للاستحواذ على كل أسهم LILCO. ومع ذلك لم تحل الشركة غير أنها بدأت بإجراء مباحثات تهدف إلى حل في وقت مبكر عام 1984 تحت رعاية حاكم ولاية نيويورك ماركو كومو، واحتاجت المشكلة إلى خمس سنين أخرى لكي تحل. ووفر الاتفاق في النهاية السبيل للتخلي عن المحطة مع زيادة أجور الكهرباء لتصحيح وضع LILCO المالي. واحتجت بعض الجماعات قائلة إن دافعي الأجور كانوا يجبرون على تعويض LILCO عن سوء تقديرها وسوء إدارتها لكن لم يتح لهم تغيير النتيجة.

ومع ذلك لم يكن التخلي عن شورهام بحد ذاته نتيجة غير اعتيادية؛ فقبل عقد من الزمن لم يكن متوقعاً حدوث ذلك. ولم تكن هناك سابقة لإلغاء مشروع تكلف مليارات الدولارات والسبب الرئيس لذلك هو الخوف الذي أدركه الناس عن حادثة – حوادث كانت تعد في عقد السبعينيات مستحيلة عملياً، لكن الخوف من الحوادث النووية بعد ثري مايل آيلاند وتشرنوبل لم يعد يبدو منافياً للمنطق.

الغبار الذري عبر الحدود: قضية دولية

ركزت حادثة تشرنوبل الانتباه على قضية السلامة النووية، حيث سجل تساقط الغبار الذري عبر الحدود في الدول المحيطة بالاتحاد السوفياتي مستويات عالية من النشاط الإشعاعي. ولم يعرف العالم في الحقيقة بالكارثة إلا عندما بدأت مستويات الإشعاع ترتفع بصورة ملحوظة في الدول المجاورة. وتلا ذلك هيجان عالمي. وانتقدت معظم دول العالم الاتحاد السوفياتي، لعدم قيامه بنشر تحذيرات حول الانبعاثات الإشعاعية وتحديده للمعلومات عن حالة تشرنوبل.

واستجاب السوفيات لهذه الاتهامات بطريقة دفاعية أولاً. وقال المسؤولون إن الغرب يستخدم الحادث ليهاجم النظام السوفياتي ويقوّض الانفراج السياسي مع الغرب. ومع ذلك، فقد أقرت الحكومة السوفياتية بعد ذلك بقليل بجسامة المشكلة، وأصبحت أكثر استعداداً في توفير المعلومات عن الكارثة. وأقر القادة ضمنياً أن حجب الأخبار مبكراً كان بسبب الإحراج الرسمي. وجرى في النهاية فصل المسؤولين الكبار في المؤسسة النووية الحكومية لمخالفاتهم الجسيمة للإجراءات

المعتمدة وكذلك أولئك المسؤولين مباشرة عن الكارثة حيث أودعوا السجن.

وما إن تلاشى الغضب الذي صاحب ردة الفعل السوفياتية في بداية الأمر حتى حل محله إدراك واسع النطاق من جميع الجهات للخطر الذي تمثله الحوادث النووية وعلى كونه مشكلة دولية ذات أبعاد كبيرة. وأعلن القادة السياسيون والعلميون في هذا الخصوص أن التعامل مع الحوادث الإشعاعية يجب أن يجري على أسس متعددة الجوانب من قبل المجتمع الدولي برمته. وقد أصبحت السلامة النووية، كما أخبر الرئيس السوفياتي ميخائيل غورباتشوف، مدير الوكالة الدولية للطاقة الذرية «إلزاما على كافة الدول».

حاولت الوكالة الدولية بدورها في اجتماعها الذي تلا الكارثة أن تبدأ عملية تدويل لأنظمة السلامة النووية. ورغم وجود اتفاق كبير على المشكلة لم يحصل تقدم يذكر في تبني إجراءات إشرافية جديدة. والإشراف الدولي على الطاقة النووية، كما سنرى في الفصل الثامن، له محدداته لأنه يثير تحديات تستهدف السيادة الوطنية – وهو حق يعود للدولة في تحديد طرق تصرفها.

ونظراً إلى جسامة حادثة تشرنوبل وتأثير ما طفح منها عبر الحدود، عبّر الخبراء في كثير من الدول عن أملهم بإمكانية تطبيق اتفاقية تحدد مستويات السلامة والنظام الذي يمكن تطبيقه، وقد اقتُرح أيضاً أن تقوم وكالة دولية مثل الوكالة الدولية للأرصاد الدولية (World Meteorological Agency) بمراقبة مستويات الإشعاع على مستوى العالم لتوفر تحذيراً سريعاً للأمم المحيطة عند وجود حادثة إشعاعية. وقد برزت أفكار أخرى عن هذا النقاش، لكن الحاجة إلى الجهد التعاوني بين الدول قد جرى الإقرار به على أي حال وهناك سبب لبعض التفاؤل على تعاون الدول في مسألة انتقال الغبار الإشعاعي عبر الحدود.

ضوابط السلامة

هناك في قلب مسائل سلامة المنشآت سؤال ذو طبيعة عامة يتعلق بالكثير من التكنولوجيا الحديثة. كم هي حقيقة سلامة ما اعتبر سليماً بما فيه الكفاية؟ انظر

(Fischhoff, Lichtenstein, Slovic, Derby, and Keeney, 1981).

السلامة النووية ليست إلا واحدة من عدة مخاطر تكنولوجية للمجتمع الحديث (وكما رأينا في الفصل السادس فالخطر الآخر يخص التلوث من المحطات التي تستخدم الوقود ـ الأحفوري). سنبحث في المحلق (ب) ضوابط معايير الصحة والسلامة على أسس أكثر عمومية. وسننظر هناك في المخاطر من وجهة نظر الكلفة والمنفعة. إن مثل هذا الأسلوب رغم كونه محفوفاً بالصعوبات يوفر نقطة البدء لتقييم المنافع المجتمعية لمعايير الصحة/ السلامة المحسنة، أو إذا فكرنا بطريقة معكوسة فسنقيم كلف المعايير الأوطأ. ويطرح السؤال الاقتصادي رغم ذلك مأزقاً أخلاقياً؛ إذ إن معيار السلامة لا يمكن أن يكون مجدياً فقط من حيث الكلفة، بل يجب أن يمتلك بعض المعايير النوعية الواجب الإيفاء بها. وعلى أي حال فإن وضع ذلك المعيار بصيغة واضحة غير ملتبسة أمر صعب بطريقة لا يمكن تجنبها. فسياسة (NRC) مثلاً (*The New York Times*, January 1983) عن منع الحوادث في المنشآت النووية تنص على «وجوب توفير مستوى من الوقاية لأفراد المجتمع من عواقب تشغيل المنشآت النووية بحيث لا يتحملون أي مخاطر إضافية مهمة تؤثر في الحياة والصحة». وأرضية هذه السياسة تقع في مفهوم الخطر المقبول الذي ترجع أصوله إلى دراسات السلامة السابقة (تقرير WASH 1400 الذي مثل أساس تقرير راسموسن لعام 1975). وهناك بالطبع مسائل تقبُّل الخطر والإجراءات المطلوبة لتوفير وقاية مناسبة. وسيستمر النقاش المحيط بسياسة NRC على أغلب الاحتمالات.

والحقيقة أن النقاش قد يتوسع. فالأمر لا يقتصر على قيام النقّاد بتحدي الصناعة النووية حتى إذا ما كانت أوفت بالهدف الأساسي، بل اختلفوا على صياغة الهدف ذاته. ويبدو ذلك موضوعياً لكن الخطر حسب التعريف أمر احتمالي ولا يمكن أن يكون تقبله أمراً موضوعياً. وما دام هناك مجال للنقاش فمن المؤكد استمراره كونه مسألة تكون الرهانات فيها كبيرة، أكان ذلك من حيث كلفتها المادية أو من حيث خطرها الصحي.

وبعد التحقيق الرسمي من قبل لجنة كيمني في حادثة ثري مايل آيلاند بدأت وكالة التنظيم النووي والصناعة النووية في الولايات المتحدة إعادة النظر في السلامة النووية. وكجزء من إعادة النظر هذه جرت إعادة نظر في أهداف السلامة لوكالة التنظيم النووي. وأجروا كذلك مسحاً لقائمة موجودات المنشآت النووية أكانت

معدات أم تصاميم. وكان لدى وكالة التنظيم النووي قائمة من قضايا السلامة التي لم يتفق على حلها قبل حادثة ثري مايل آيلاند. غير أن الحادثة دفعت بالمسؤولين لينظروا إلى بعض المكونات الأساسية بنظرة مختلفة. وقد بحثوا من بين عدد من الأشياء سلامة أنابيب مراجل مفاعلات الماء المضغوط والذبذبات التي يولدها طرق الماء (Water Hammer) في مفاعل الماء المضغوط وتشققات أنابيب مفاعلات الماء المغلي، ومتانة مواد وعاء احتواء المفاعل.

وأعلنت وكالة التنظيم النووي أن بعضاً من قضايا المعدات التي بقيت معلقة لفترة طويلة قد وُفر لها الحل من خلال إصدار أنظمة ومعايير جديدة. فقد وسعت الوكالة مثلاً من معايير النوعية الخاصة باللحام أوعية احتواء المفاعل استجابة لمشاكل الهشاشة (Brittleness).

وعند تبني مثل هذه التغييرات في التصميم من قبل وكالة التنظيم النووية أو عندما تعيد توكيد الأنظمة والمواصفات القائمة فهي تفعل ذلك بطريقة مميزة مع الإعلان عن أن الأحوال السائدة رغم الحاجة إلى التغيير لا تمثل أي خطر مفرط بصورة عامة. والوكالة بتعبير آخر تدعي لنفسها الحق في أن تحدد مقدار السلامة الكافية. لكن الأسلوب السائد مع ذلك يبقى عرضة لبعض التساؤلات الفلسفية الجوهرية. غير أنه يثير سؤالاً عملياً: كيف يمكن لوكالة التنظيم النووية أن تقوم بمثل هذه التقييمات المطمئنة حول السلامة عندما فشلت بوضوح في التعرف على المشاكل في تصميم الأنظمة الجديدة لتجاوزها؟ إن منتقدي التكنولوجيا النووية في الحقيقة لم يتقبلوا دوماً أن الأنظمة الجديدة تقدم فعلاً حلولاً لمشاكل محددة، ناهيك بوضع حل شامل لمشاكل السلامة.

التخلص من النفايات النووية وانتشار الأسلحة

هناك بجانب قضايا سلامة المنشآت قضايا أخرى لم تجد حلاً حتى الآن تتعلق بالمنتجات الجانبية للمفاعلات وهي النفايات النووية. وتنتج هذه النفايات من انشطار وقود اليورانيوم في المفاعل. وبعض هذه المنتجات الانشطارية ذات أعمار طويلة وعالية الإشعاع، لذا فهي تمثل خطراً كامناً على البيئة وعلى المجتمع لأجيال. وهي تواجهنا بمأزق تكنولوجي أيضاً، أكان ذلك في مناولتها بعد إزالتها من المفاعل أم

بطريقة التخلص النهائي منها. ويتطلب التخلص منها عزلها لآلاف السنين، وذلك يضعنا بمواجهة مشاكل تكنولوجية وأخرى مؤسساتية غير مسبوقة أيضاً. والاعتبار الخطير الآخر في ما يخص مخلفات المفاعلات النووية هو إمكانية تحويلها للاستخدام كأسلحة. والمنتوج المحدد في المخلفات ذو الأهمية هو Pu^{239} (وهو مادة للأسلحة) الذي يمكن فصله عن عناصر الوقود بوسائط كيميائية. وسيجري بحث هذه الاعتبارات بتفاصيل أكبر في الفصل التالي.

المراجع

Books

Collier, J. G. and G. F. Hewitt. *Introduction to Nuclear Power*. New York: Hemisphere Publishing, 1987.

Fischhoff, B. [et al.]. *Acceptable Risk*. Cambridge: Cambridge University Press, 1981.

Ford, D. (Executive Director). *The Nuclear Fuel Cycle*. Union of Concerned Scientists. Cambridge, MA: MIT Press, 1975.

Ford, D. *The Cult of the Atom - The Secret Papers of the Atomic Energy Commission*. New York: Simon & Schuster, 1982.

Grenon, M. *The Nuclear Apple and the Solar Orange - Alternatives in World Energy*. New York: Pergamon, 1981.

Kaku, M. and J. Trainer. *Nuclear Power: Both Sides- The Best Arguments For and Against the Most Controversial Technology*. New York: Norton, 1982.

Lamarsh, J. R. *Introduction to Nuclear Engineering*. Second Edition. Reading, MA: Addison-Wesley, 1983.

Lipschutz, R. D. *Radioactive Waste – Politics, Technology and Risk*. Cambridge, MA: Ballinger, 1980.

Perrow, C. *Normal Accidents - Living with High-Risk Technologies*. New York: Basis Books, 1984.

Segre, E. R. *Collected Papers of Enrico Fermi*. Chicago: University of Chicago Press, 1965. Vol. 2.

Stobaugh, R. and D. Yergin. *Energy Future*. Third Edition. New York: Vintage Books, 1983. (See Chapter 5, Nuclear Power: The Promise Melts Away).

Tenner, E. *Why Things Bite Back - Technology and the Revenge of Unintended Consequences*. New York: A. A. Knopf, 1996.

Weart, S. Nuclear Fear - A History of Images. Cambridge, MA.:Harvard University Press, 1988.

Reports

Kemeny, J. G. (Chairman). «The Accident at Three Mile Island- Report of the President's Commission on TMI». Washington, DC: US Government Printing Office, October 1979.

Reviews of Modern Physics. 1975. Vol. 47. Supplement No. 1, Report to the APS by the Study Group on Light-Water Reactor Safety.» Summer (contains critique of the AEC repprt WASH 1400).

Magazines

Bulletin of the Atomic Scientists

J. Beyea and F. Von Hippel. «Containment of a Reactor Melt-down.» Aug./ Sept. 1982, pp. 52-59.

R. J. Lifton. «Nuclear Energy and the Wisdom of the Body.» September 1976, pp. 16-20.

Special Issue on «Chernobyl- Ten Years Later». pp. 20-59, May/ June 1996.

IEEE Spectrum (published monthly by the Institute of Electrical and Electronic Engineers).

«Analyzing Malfunctions of Nuclear Power Plants.» June 1983, pp. 53-58.

«Finding the Flaws in Nuclear Power Plants.» September 1982, pp. 55-60.

«The Puzzle of Chernobyl.» July 1986, pp. 34-41.

N. Rasmussen. «Rasmussen on Reactor Safety.» August 1975, pp. 46-55 (based on WASH 1400).

Special Issue. «Three Mile Island and the Future of Nuclear Power.» November 1979.

Nucleas

C. Komanoff and E. E. Van Loon, 1982. «Too Cheap to Meter or Too Costly to Build: How Nuclear Power Has Priced Itself Out of the Market.» A Report to the Union of Concerned Scientists. Sponsors, Vol. 4, No.1, pp. 3-7.

Science (weekly publication of the American Association for the Advancement of Science, AAAS).

F. R. Mynatt. «Nuclear Reactor Safety Research Since Three Mile Island.» 9 April 1982, Vol. 216, pp. 131-135.

News and Comments. «Assessing the Effects of a Nuclear Accident.» 5 April 1985, Vol. 228, pp. 31-33.

News and Comments. «Ultra Safe Reactors, Anyone?» 21 January 1983, Vol. 219, pp. 265-267.

J. J. Taylor. «Improved and Safer Nuclear Power.» 21 April 1989, Vol. 244, pp. 318-325.

Special News Report: «The Explosions that Shook the World.» April 19 1996, Vol. 272, pp. 352-360.

Technology & Culture

J. G. Gunnell. «The Technocratic Image and the Theory of Technocracy.» July 1982, Vol. 23, No.3, pp. 392-416.

Technology and Society (magazine published quarterly by the IEEE Society on Social Implications of Technology), Special Issue. Debate on Nuclear Electric Power Generations. March 1984, Vol. 3, No. 1.

الفصل الثامن
دورة الوقود النووي

مقدمة

يخضع الوقود النووي لدورة تبدأ بالاستخراج والإعداد والاستخدام وتنتهي بالتخلص من الفضلات. وهناك خلال مسار هذه الدورة أخطار تهدد الصحة والممتلكات وذلك ما يواجه المجتمع في بعض الأحيان بمسائل اجتماعية وأخلاقية هائلة. وهناك واجهتان رئيستان لمشاكل دورة الوقود. **الأولى** هي أن مخاطر الوقود النووي المصنّع اليوم ليست كبيرة وحسب بل إنها ستستمر لأجيال قادمة. **الثانية** هي أن طرق المعالجة نفسها المستخدمة في دورة الوقود النووي (والعديد من العناصر المتولدة في تلك الدورة) يمكن استخدامها لصنع الأسلحة النووية.

ويبين الشكل 8-1 مراحل دورة الوقود الانشطاري لمحطة تشغيل تجارية. وبالإمكان تمييز الخطوات التالية في الدورة التي تستخدم اليورانيوم:

ـ تعدين خام اليورانيوم بهيئة أكسيداليورانيوم (U_3O_8).

ـ تحويل إلى صورة غازية (سادس فلوريد اليورانيوم UF_6).

ـ تخصيب تراكيز نظير اليورانيوم ^{235}U.

ـ تصنيع اليورانيوم المعالج لإنتاج قضبان وقود المفاعل.

ـ استخدام المفاعل للانشطار الذي تنتج منه الطاقة[1].

---

1 ـ لم يجر الاتفاق بصورة كاملة على سياسات التخلص من المواد المشعة في النفايات النووية أكان ذلك في الولايات المتحدة أو في أقطار أخرى. وقد خططت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة التي تعمل تحت مظلة قانون سياسة النفايات النووية لعام 1982 لفتح أول مستودع في عام 1998 لكن جرى دفع التاريخ إلى بعد عام 2000. إن تقييم واختيار مواقع هذه المستودعات في الحقيقة لن ينتهي تماماً في الأغلب حتى نهاية التسعينيات أو بعد ذلك ـ وقد برهنت كل الاقتراحات حتى الآن على كونها مثيرة للجدل.

ـ خزن (وربما إعادة معالجة) وقود المفاعل المستنفد بما في ذلك اليورانيوم والبلوتونيوم وبقية منتجات المخلفات المشعة.

ـ التخلص من المواد الإشعاعية والانشطارية في الوقود المستنفد.

وقد جرى بحث بعض هذه الخطوات في الفصل السابع. والأثر البيئي والخطوات (1-5) من الدورة كانت موضع الاهتمام الأولي لذلك الفصل. أما هنا فسنبحث في الخطوات الأخيرة للدورة، وهي تخص ما يحدث للوقود المستنفد عندما يترك المفاعل. وسننظر أيضاً في المخاطر التي تمثلها هذه النفايات، وكيفية حل هذه المشاكل، وكيف يمكن أن تزيد تكنولوجيا المفاعل المولد (Breeder Reactor) المقترحة مشاكل نهاية الخطوات الخلفية (والخطوات الأمامية) بصورة هائلة.

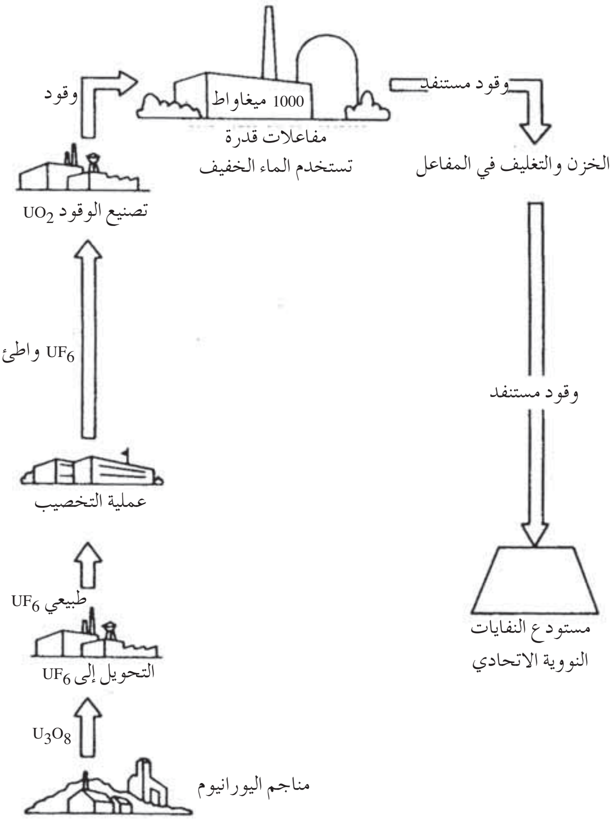
إدارة النفايات النووية والتخلص منها

يعتبر وقود المفاعل النووي (LWR) مستنفداً عندما يكون نحو 75 في المئة من ^{235}U فيه قد خضع للانشطار. لكنه ينتج على أي حال من اليورانيوم (بنوعية U^{235}، ^{238}U) خلال دورة استخدامه كوقود العديد من العناصر الأخرى بواسطة الانشطار أو بواسطة عمليات التحول الأخرى. وأحد هذه العناصر وهو البلوتونيوم الذي يمكنه أن ينشطر ويطلق طاقة مفيدة، لكن بقية منتجات المفاعل غير قابلة للانشطار ولا تساهم بأي قدر في توليد الطاقة.

ورغم ذلك، فإن الكثير من هذه المنتجات شديدة السمّية، ما يجعل مناولتها وخزنها والتخلص النهائي منها صعباً. ولا يقتصر الأمر على كونها مشعة بدرجة عالية بل إنها تستمر بتوليد حرارة. إنما تنخفض كل من الفعالية والحرارة نتيجة التحلل الإشعاعي. ويختلف الزمن المطلوب للتحلل بصورة كبيرة بين أنواع العناصر الموجودة في الوقود المستنفد. ويبين الجدولان 8-1 و8-2 منتجات الانشطار المختلفة والأكتينيدات[2] لطن من الوقود المستنفد لمفاعل الماء الخفيف. وأعمار النصف للمادة المشعة (وقت التحلل إلى نصف المستوى الإشعاعي) للعناصر المدرجة بين 285 يوماً و17 مليون سنة، وفيها النظير المهم البلوتونيوم الانشطاري U^{239}

2 ـ تعود الأكتينيدات إلى مجموعة من النظائر التي تتبع عنصر الأكتينيوم في الجدول الدوري وتشمل عناصر ما بعد اليوارنيوم (وهي عناصر تحوي بذاتها مختلف نظائر البلوتونيوم).

الذي يصل نصف حياته فقط بعد 24400 سنة، وهو وقت أطول من كل التاريخ المدون للجنس البشري. ويشمل الجدول 8-1 مقدار الفعالية الإشعاعية مقاسة بالكيوري[3] (Ci) لكل عنصر عبر فترات زمنية تبلغ حتى 100000 عام (أما تحلل القدرة الحرارية عبر الزمن لكل طن من الوقود المستنفد فيظهر بشكل خط بياني في الشكل (8-2أ)).



الشكل 8-1: دورة الوقود النووي

المصدر: U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG-0016, October, Washington D.C. 1976.

وإذا ما حدث خلال هذه الفترة الزمنية الهائلة أي تسرب غير مسيطر عليه لمواد النفايات النووية في البيوسفير فسيتعرض الجمهور للخطر. ويمكن قياس الخطورة بالسمية النسبية للنفايات مقارنة بسمية خام اليورانيوم الفعال إشعاعياً في حالته الطبيعية.

3 ـ وهي تمثل وتيرة تحطم المواد المشعة حيث إن 1 كيوري = 3.7×10^{10} تحطم/ ثانية. وهذا مقياس للفعالية الإشعاعية بغض النظر عن الكتلة. فالغرام الواحد من الراديوم مثلاً يمتلك فعالية أشعاعية تبلغ واحد كيوري، فيما يمتلك غرام واحد من الوقود المستنفذ نحو نصف كيوري.

الجدول 8-1: نموذج لحصيلة الأكتينيدات [أ]

العنصر	عمر النصف (y)	(q) 0.3 (y)	(Ci) 0.3 (y)	(q) 10(y)	(Ci) 10(y)	(q) 500(y)	(Ci) 500(y)	(q) 10000 (y)	(Ci) 10000(y)	(q) 100000(y)	(Ci) 10000(y)
	فترات التحلل (ب)										
^{237}Np	2.1×10^{6}	760	0.59	760	0.59	786	0.61	810	0.63	790	0.61
^{238}Pu	86	5.8	105	5.5	100	0.1	1.8	-	-	-	-
^{239}Pu	24400	27.5	1.7	27.5	1.7	32	2.0	59	3.5	4.5	0.3
^{240}Pu	6580	8.5	2.0	19.2	4.5	38.4	8.8	13.9	3.2	-	-
^{241}Pu	13.2	4	464	2.4	273	-	-	-	-	-	-
^{242}Pu	379000	2	0.009	2	0.009	2	0.009	2	0.009	1.7	0.007
^{241}Am	462	54	189	55.6	198	29.5	103	-	-	-	-
^{243}Am	7370	82	17.0	82	17.0	77	16.0	31	6.5	-	0.001
^{244}Cm	17.6	30	2570	19.7	1700	-	-	-	-	-	-
المجموع غرام/ طن متري من الوقود		974	974			965		916		796	50
الاكتينيدات بما فيها المنتجات الوليدة (تقريباً)			200,000		10000		900				

(أ) يشمل النفايات متوسطة وطويلة عمر النصف الناجمة عن معالجة طن واحد من وقود مفاعل ماء خفيف مشع إلى 33×10^{9} واط – يوم (حراري) لكل طن متري من الوقود.

(ب) الرمز = g غرام لكل طن متري من الوقود (كيوري = Ci).

المصدر: منقولة بإذن من The Nuclear Fuel Cycle, The Union of Concerned Scientists, The MIT Press, Cambridge, MA, 1975.

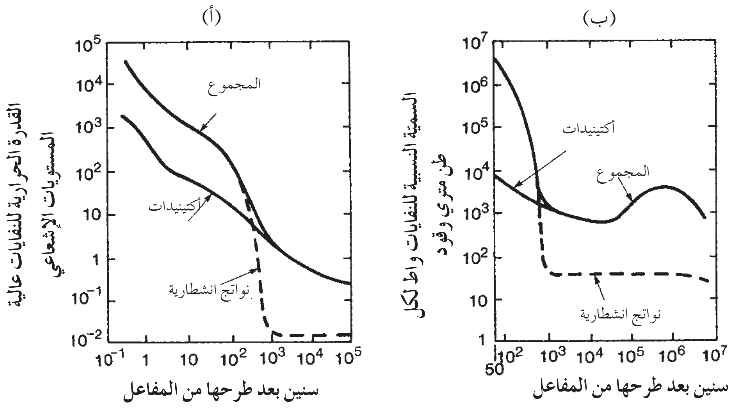
الجدول 8-2: نموذج لحصيلة المواد الانشطارية النمطية [أ]

العنصر	عمر النصف	الإشعاعية المتبقية – كيوري			
		10 (y)	100 (y)	500 (y)	1000 (y)
$^{144}Ce/^{144}pr$	285 يوم	300	-	-	-
$^{106}Ru/^{106}Rh$	367 يوم	1100	-	-	-
^{155}Eu	1.8 y	160	-	-	-
^{134}Cs	2.1y	8300	-	-	-
$^{125}Sb/^{125}Te$	2.7y	980	-	-	-
$^{90}Sr/^{90}Y$	28.1y	$1.2x10^5$	$1.32x10^4$	0.6	-
$^{137}Cs/^{137}Ba$	30y	$1.6x10^5$	$2.1x10^4$	2	-
^{151}Sm	90y	1100	520	30	0.4
^{99}Tc	$2.1x10^5$y	15	15	15	15
^{93}Zr	$9x10^5$y	3.7	3.7	3.7	3.7
^{135}Cs	$2x10^6$y	1.7	1.7	1.7	1.7
^{107}Pd	$7x10^6$y	0.013	0.013	0.013	0.013
^{129}I	$17x10^6$y	0.025	0.025	0.025	0.025
مجموع الكيوري (تقريباً)		300000	35000	53	22

(أ) يشمل النفايات متوسطة وطويلة عمر النصف الفيزيائي الناجمة عن معالجة طن واحد من وقود مفاعل ماء خفيف مشع إلى 33×10^9 واط – يوم (حراري) لكل طن متري من الوقود.

المصدر: منقول بإذن من The Nuclear Fuel Cycle,

The Union of Concerned Scientists, The MIT Press, Cambridge, MA. 1975.



الشكل 8-2: التحلل الإشعاعي للنفايات عالية المستوى من مفاعل ماء خفيف

(أ) القدرة الحرارية لطن من مخلفات المفاعل مقابل سنين بعد طرحها.

(ب) السميّة النسبية (مقارنة بخام اليورانيوم) مقابل سنوات بعد الطرح.

مقتبسة من: Ford (1975) .

ونتمكن في الشكل (8-2 ب) أن نرى وجود حاجة إلى ألف عام لكي تتحلل سُمّية نفايات المفاعل لتتحلل سمّيتها من بضعة آلاف مرة إلى نحو مليون مرة إلى مقارنة بخام اليورانيوم الطبيعي. ولن تتحلل بقدر كبير بعد ألف عام إلى ما هو أقل من عامل نسبي مقداره ألف. وهو في الحقيقة يبدأ بالتزايد مرة ثانية بعد مليون عام أو أكثر بسبب العناصر الوليدة (Daughter Elements) التي تنشأ تلقائياً من عملية التحلل الإشعاعي[4].

تقوم الدول التي لديها محطات نووية عاملة في الوقت الحالي بخزن المخلفات النووية وقتياً بدل التخلص منها نهائياً. وقد نشأ هذا الموقف بسبب الشكوك القوية حول جدوى الخطط الحالية التي اقترحت للتخلص من النفايات على المستويين النهائي وبعيد المدى. ويجري في الولايات المتحدة خزن جميع الوقود المستنفد في موقع المفاعل داخل حوض ماء يشبه حوض السباحة (يمتص الحوض الإشعاع كما يشتت حرارة التحلل). ويمكن استخدام طرق وقتية أخرى بديلة للتعامل مع النفايات إذ يمكن مثلاً خزنها في مخازن مركزية أو معالجتها لاستخلاص المواد الانشطارية فيها لتستخدم ثانية في قضبان الوقود. ومع تراكم النفايات من المفاعلات العاملة يتنامى المأزق الأساسي حول طرق التخلص منها على المدى البعيد.

هذا ويجب أن يحقق التخلص من النفايات على المدى البعيد المعايير المقبولة للسلامة مع الأخذ بالحسبان مخاطر حوادث التسرب الإشعاعي إلى البيئة. ويمثل التخلص من هذه النفايات مشاكل تكنولوجية ومجتمعية غير مسبوقة، وذلك نظراً إلى أعمار النصف الطويلة لنواتج الانشطار. من الناحية التكنولوجية، يجب كذلك أن تؤمن طريقة التخلص تكنولوجياً درجة عالية من العزل لآلاف السنين. وبذلك تبرز الحاجة لمواد احتواء وأساليب تخلص تعرف باستقراريتها طوال هذه الفترة. إضافة إلى ذلك فإن التخلص من هذه المواد إن لم يكن نهائياً (أي إنه لا يستدعي أي تدخل من جانب الإنسان بعد ذلك) فقد يُجابه المجتمع مشكلة حراسة هذه النفايات. وهنا يجب على المجتمع أن يقوم بذلك لفترة من الزمن تطول على عمر أي حضارة مدونة في التاريخ.

لقد التفت صنّاع السياسة في حكومة الولايات المتحدة – الكونغرس ووزارة

4 ـ العناصر الوليدة (Daughter elements) هي عناصر جديدة تنتج من انفلاق النوى خلال العملية الإشعاعية. فعند إنفلاق النوى القابلة للانشطار في المخلفات تتولد عناصر جديدة ذات نوى غير مستقرة. وفي حالة مخلفات المفاعل تمتلك العناصر الوليدة انبعاثاً إشعاعياً أشد من العناصر التي ولدت منها.

الطاقة – إلى مفهوم العزل الجيولوجي كهدف أوحد للتخلص من النفايات الإشعاعية. وقد تبنوا سياسة لإحراز سلامة موثوقة على المدى البعيد ضد حوادث التسرب الإشعاعي لأكثر أنواع النفايات الإشعاعية خطورة والمسماة بالنفايات عالية الإشعاع[5] (High Level Waste) (HLW). وإذا ما نجحوا في ذلك فسيكونون قد أوفوا بالتزاماتهم تجاه السلامة العامة. وما يعنيه العزل الجيولوجي هو وضع النفايات في الصخر والتشكيلات الرسوبية في قشرة الأرض في موضع كان قد بقي سليماً ـ أي إنه لم يتعرض لتحركات زلزالية أو تكتونية ـ لملايين السنين.

ومثل هذه التشكيلات موجودة على الأرض وتحت سطح المحيطات رغم أن كيفية تشخيصها ومن ثم استخدامها يبقى غير واضح. فقد حاول النقاد في الولايات المتحدة أن يبرهنوا على أن المواقع التي يجري التفكير بها كمستودعات للتخلص من النفايات النووية قد لا تكون بالاستقرارية التي تدعيها الحكومة. ومع ذلك فإن الخطط تستدعي وضع النفايات عميقاً في هذه التشكيلات ضمن آبار فائقة العمق تحفر لهذا الغرض، أو في سراديب مناجم أو بواسطة صهر الصخور. وهذه التقنية الأخيرة ستستغل حرارة تحلل النفايات ذاتها لصهر الصخور حتى تغوص النفايات عميقاً في الأرض.

ومع ذلك، فقد برهن الواقع على أن تطوير تقنية مقبولة للتخلص من النفايات النووية أمر صعب. فالتوليد المستمر لحرارة التحلل قد يولّد حالات انصهار غير مستقرة في بعض أوساط التخلص من النفايات. وكانت هناك شكوك حول احتمالية توليد شقوق في الصخر نتيجة هذه الحالات، ما قد يؤدي بدوره إلى انتقال المواد المشعة إلى المياه الجوفية. وما زالت هناك تساؤلات تتردد حول القدرة على احتواء النفايات. فقد كان يفكر مخططو الولايات المتحدة في أواسط الثمانينيات في وضع النفايات عالية الإشعاع في حاويات أو بصورة مواد صلبة مزججة. وكان هناك نقاش يدور بين الخبراء حول إمكانية تقنيات الاحتواء هذه مقاومة الفعالية الكيميائية والضغوط ودرجات الحرارة لمدة طويلة (Lipschutz, 1980).

---

5 ـ النفايات عالية الإشعاع (HLW) تعرف رسمياً بأنها (تيارات النفايات الناتجة عن عملية إعادة معالجة وقود المفاعل المستنفذ) (Lipschutz, 1980). ومع ذلك فإن النفايات عالية الإشعاع عملياً تتألف في المقام الأول من قضبان وقود مستنفد ذاتها. وهي على أي حال متميزة من المواد التي تلوثت، غير أنها لم تكن مادة إشعاعية أساساً ـ مثل أنابيب المفاعل.

وتتضخم مشاكل التخلص على المدى البعيد عندما نأخذ بنظر الاعتبار الإطلاق المتعمد للمواد الإشعاعية وليس فقط التسرب نتيجة حادث. وما نعنيه بالإطلاق المتعمد هو استعادة النفايات بهدف تصنيع السلاح. وقد تبدو الاستعادة السهلة للنفايات المدفونة عميقاً في الأرض أمراً غير متوقع، إنما لا يوجد ما يدعو إلى الاعتقاد أن الاستعادة ستكون صعبة بعد مرور آلاف السنين على خزنها. ويمكن استخدام النفايات لصنع أسلحة نووية تفجيرية، أو لتصنيع أسلحة إشعاعية بطريقة أبسط حيث يؤدي إطلاق انتشار الجسيمات السُمّية – كأن يكون بواسطة مرشات الهباء (Aerosol Sprayers) – إلى انتشار واسع للموت وإلى اضطراب اجتماعي.

وأخطر المواد في النفايات عالية الإشعاع هو البلوتونيوم ^{239}Pu وفصله من قضبان الوقود المستنفد عملية كيميائية بسيطة نسبياً لسوء الحظ. والبلوتونيوم ينتج في المفاعلات النووية بصورة مستمرة. فمفاعل الماء الخفيف الاعتيادي يولد نحو 8 كيلوغرامات من البلوتونيوم شهرياً عند اشتغاله. ويكفي استنشاق أو ابتلاع بضعة ميكروغرامات من البلوتونيوم لتسبب وفاة الإنسان. كما إن 15 كيلوغراماً منه، أو حتى أقل من ذلك قد يكون كافياً لتصنيع قنبلة انشطارية بدائية. وقد اقترح البعض إعادة معالجة قضبان الوقود المستنفد لاستخلاص البلوتونيوم منها لكونه قابلاً للانشطار، حيث يمكن إعادة استخدامه في المفاعلات. ومع ذلك، فإن إعادة المعالجة ستفضي إلى خطر إضافي على المدى القصير: فكميات البلوتونيوم المفصول الكبيرة يمكن بسهولة تجميعها لصنع أسلحة.

وقد اقترحت دورة وقود بديلة تعتمد الثوريوم كطريقة للتخلص من مشكلة البلوتونيوم. والبلوتونيوم كما رأينا في الفصل السابع يوَلد من ^{238}U غير الانشطاري خلال عملية التفاعل الإنشطاري للـ ^{235}U. أما الثوريوم الذي يوجد أيضاً كخام في الطبيعة ويوازي اليورانيوم في ابتذاله فيمكن استخدامه في دورة وقود لا توجد في نفاياتها المنتجة مادة صالحة لصنع الأسلحة. وتولد دورة الثوريوم نظير اليورانيوم ^{233}U الانشطاري الذي يمكن استخدامه كوقود مفاعلات، كما يمكن حمايته ضد تحويله للاستغلال كسلاح وعلى المدى القصير والطويل من خلال طريقة تدعى تغيير الخواص (Denaturing). وتغيير الخواص نوع من التخفيف الذي يحتاج إلى معالجة تخصيب كاملة للتغلب عليه. وهكذا يمكن أن يترك وقود الثوريوم المستنفد في حالة مساوية لخام

اليورانيوم الطبيعي وبذلك لن يكون مهيأ لإنتاج سلاح. ومع ذلك لا يوجد توجه عالمي نحو دورة الثوريوم، وحتى إذا ما كان هناك مثل هذا التوجه فإن مشكلة التخلص من البلوتونيوم (وبقية النفايات عالية الإشعاع) لن تكون قد حُلّت. وقد كان هناك في نهاية الثمانينيات في الولايات المتحدة وحدها أكثر من عشرة آلاف طن من الوقود المستنفد في أحواض الخزن في المحطات النووية وفي حاجة إلى التخلص منه بصورة دائمية.

ولغرض التغلب على أي محاولة مقصودة في أي وقت في المستقبل البعيد لاستعادة النفايات النووية المتخلص منها، يجب أن تتصف طريقة التخلص بما دعاه جين روشلين (Gene. I. Rochlin) بلا انعكاسية (Irreversibility) شديدة [6]، أي إن طريقة التخلص ينبغي ألا يكون فيها إلا إمكانية ضئيلة جداً للاسترداد. ويمكن لتقنيات التخلص حسب مفهومه أن تتراوح بين غير قابل للعكس تقريباً إلى غير قابل للعكس بصورة قطعية. وهناك تقنيتان غير قابلتين للعكس أبداً، أو أنهما جوهرياً كذلك: **الأولى** تتضمن التخلص من النفايات الإشعاعية بقذفها في الفضاء، و**الثانية** بتحويل عناصر النفايات إلى عناصر سليمة. وليس الخيار الأول بالخيار الجدي، فما من شخص مسؤول مستعد للمجازفة بنشر كميات هائلة من الإشعاع في الفضاء بسبب إمكانية فشل دافع صاروخي، وبخاصة بعد حادث تشالنجر.

أما طريقة تحويل العناصر فهي ممكنة نظرياً باستخدام معجلات الجسيمات أو مفاعلات الاندماج النووي حيث تجري عملية قذف النوى بجسيمات عالية – الطاقة. وستكون الفائدة الأكبر لهذه الطريقة عند استخدامها في معالجة الأكتينيدات ذات نصف العمر الطويل في الوقود المستنفد وهو ما يتطلب في البداية عملية فصل (تجزئة). وعلى أي حال لا يتوقع أن تكون هذه التقنية ممكنة من الناحية العملية في الوقت الحاضر أو في المستقبل القريب لأنها ستستهلك من الطاقة الكهربائية أكثر مما ينتجه المفاعل في الأصل.

وهذا يتركنا مع خيار العزل الجيولوجي البعيد. غير أن هذه الطريقة رغم جدواها لا يمكن أن تكون غير قابلة للعكس بصورة تامة. فهناك درجات مختلفة من اللاانعكاسية

---

6 ـ يسجل روشلين (1977) نقطة مهمة أخرى هنا. فهو يفرّق بين عدم الاسترداد من قبل الإنسان مسمياً إياها (لا انعكاسية اجتماعية) واللاانعكاسية الفيزيائية للتشكيلات الجيولوجية المستقرة.

التي يمكن التوصل إليها تبعاً لروشلين (1977). فهو يصنف الدفن العميق في آبار محفورة في الصخر (وانصهار الصخور الذي يلي ذلك بسبب حرارة التحلل) على اليابسة، وأيضاً الدفن في قعر البحار العميقة على أنها تمثل «لاانكعاسية عالية».

وكلما كانت لاانعكاسية الاسترداد التي يختارها المجتمع كبيرة كلما كانت المتطلبات التكنولوجية والكلفة كبيرين. فالدفن في أعماق البحار مثلاً سيكون أصعب بكثير ومكلفاً مقارنة بالدفن على اليابسة. ومع ذلك فإن تقييم الكلفة الكلية والمنفعة لأي تقنية للتخلص من النفايات يمثل مشكلة تتجاوز إمكانية أي منهجية حالية. وحسابات الكلفة والمنفعة التقليدية مثل تلك التي تُبحث في الملحق (ب) هي أساساً ليست ذات فائدة في قضية التخلص من النفايات لأن الكلفة النهائية ـ بما فيها تلك المتعلقة بالإطلاق العَرَضي أو المقصود – غير معروفة وستكون غير قابلة للاحتساب على أي حال إذا ما أخذنا المقياس الزمني المتضمن (انظر:Grossman and Cassedy, 1985). لكن الكلفة الممكنة لحادث لا يمكن في الوقت ذاته أن تهمل. والحقيقة أنها كبيرة بدرجة في ما يخص المعاناة الإنسانية بحيث يجب أن تنال الأولوية العليا من وجهة نظر أخلاقية.

ولما كانت الآثار قد تظهر بعد آلاف السنين، فنحن نتعامل مع قضية أخلاقية ذات أبعاد تتخطى الأجيال ـ وهي قضية تكون المجتمعات التي قد تتأثر بها خارج إمكانيات تخيلنا. وهذا يعقد مأزقنا حينما نقرر إلى أي مدى يجب أن يذهب المجتمع الحالي لكي يحدد المخاطر التي تتهدد نسله بعد آلاف السنين في المستقبل.

وعلينا أن نشير هنا إلى أن سياسة حكومة الولايات المتحدة تنص على أن الضرر الذي قد تسببه المشاريع التكنولوجية مستقبلاً ينبغي ألا يتجاوز الضرر الذي تسببه للجيل الحالي. وقد حاول بعض الفلاسفة أن يقنعونا أن علينا واجباً أكبر بحماية الأجيال المستقبلية لأنها لم يكن لها رأي في اختيار المخاطر التي «نصدّرها» إليهم. غير أن هذا الجدل له واجهة أخرى وهو أننا لما كنا لا نعرف تفكير وطبيعة الأجيال المستقبلية فإننا في الحقيقة نتجاوز الحدود عندما نقوم بمجرد الاختيار لأجلهم. فمن الممكن مثلاً أن نتصور أن المستقبل سيحتاج إلى نفايات سهلة الاسترداد يستخدمها كوقود لتوليد القدرة وستكون اللاانعكاسية عندئذ غير مرغوب فيها من وجهة النظر المستقبلية. وما هو أكثر دلالة أننا لا نستطيع فعلاً أن نعرف ما هو الأفضل بالنسبة

إليهم. وتبعاً لهذا المنظور يمكننا أن نستنتج أن أفضل ما نستطيع أن نفعله هو أن نختار ما هو الأكثر قبولاً من الناحية الأخلاقية لنا ولأولادنا وندع المستقبل يتخذ قراراته[7].

وإذا ما قرر مجتمعنا أن يذهب بعيداً في محاولة حماية أجيال المستقبل حتى غير البعيد، فسيترتب علينا أن ندفع أكثر الآن. وستنعكس الكلفة على الكلفة الإجمالية لتوليد الطاقة الكهربائية من الطاقة النووية، لأن التخلص من النفايات سيصبح جزءاً من كلفة القدرة. وهذا أمر غير مصرح به دائماً في النقاش عن النفايات الذي ينحو إلى التركيز على السلامة. غير أن السلامة مكلفة وهي في هذه الحالة ستؤثر على كلفة الطاقة التي نستخدمها.

الطاقة النووية ـ الاستخدامات السلمية وغير السلمية

إن تكنولوجيات الطاقة النووية كما ذكرنا في البداية ورغم أنها مقصودة للاستخدام السلمي، إلا أنها مرتبطة بطريقة لا انفكاك عنها فيزيائياً، مع تكنولوجيات التسليح النووي. ويواجه العالم نتيجة ذلك بالتهديد المخيف المتمثل بانتشار الأسلحة النووية.

إن التعامل التسلسلي الموصوف في الفصل السابع هو العملية الأساسية لكل من الطاقة النووية والأسلحة النووية. ويصح هذا على مستويين:

إن التفاعل التسلسلي هو الوسيلة التي يجري بواسطتها إطلاق الطاقة لأغراض سلمية كانت أو عسكرية.

إن التفاعل التسلسلي هو الوسيلة الأولى لتوليد البلوتونيوم (انظر الفصل 7) للاستخدام في الأغراض العسكرية أو كوقود نووي.

---

7 ـ فقد لاحظ الاقتصادي س. أ. مارغلن (S. A. Marglin) مرة على سبيل المثال أن رفاه الجيل الحالي يمتلك أسبقية كنتيجة ضرورية للديمقراطية. والأمر كما ادعى «منطقي بحيث إن حكومة ديمقراطية تعكس فقط خيارات الأفراد الذين هم حالياً أعضاء في الجسد السياسي» S. A. Marglin, «The Social Rate of Discount and the Optimal Rate of Investment,» *Quarterly Journal of Economics*: vol. 77 (1963), pp. 95-112)

وقد كتب الفيلسوف مارتن غولدنغ أيضاً قائلاً «كلما ازداد بعد الجيل الذي نركز عليه تناقصت احتمالية امتلاكنا واجباً لتعزيز ما هو مفيد له» (Partridge, 1981). ووجهة نظر غولدنغ هي أننا لا نستطيع معرفة ما سيشكل «الحياة الطيبة للناس في المستقبل البعيد، لذا يصعب علينا تعزيز ذلك، ومع ذلك يبدو مشكوكاً أن أي عصر سيجد التلوث الإشعاعي أكثر من لعنة اجتماعية».

كان الانشطار النووي تاريخياً قد استخدم للمرة الأولى بالطبع في تطوير القنبلة الذرية خلال الحرب العالمية الثانية. ويعد أول برهان تجريبي على التفاعل التسلسلي[8] عمل فيزيائيو الولايات المتحدة على تطوير وسائل التجميع الفجائي ضمن القنبلة لكتلة تفوق الحجم الحرج لخلق تفاعل تسلسلي سريع التطور لتوليد وإطلاق عنيف للطاقة، وقد استخدموا نوعين من العناصر – اليورانيوم المخصب (^{235}U) والبلوتونيوم (^{239}Pu) التي ولدت سابقاً في مفاعلات انشطارية.

وكانوا قد بينوا في عام 1945 أن أياً من العنصرين يمكن أن يستخدم لتصنيع الأسلحة. كما بينوا بعد ذلك أن نفس التفاعل التسلسلي في نمطه المسيطر عليه يمكن أن ينتج قدرة نووية. وبعبارة أخرى فإن الطرق الحالية المستخدمة لتوليد القدرة النووية ودورة الوقود لا تتميز فيزيائياً عن تلك المستغلة في الأسلحة النووية. لذلك فإننا وخلال عملية نشر القدرة النووية حول العالم نزيد من احتمالية انتشار الأسلحة النووية كذلك، وهو أمر لا يمكن تجنبه.

فكل من الأسلحة وتوليد القدرة بحاجة إلى نظائر قابلة للانشطار (أما ^{235}U أو ^{239}U) بتراكيز كافية لإدامة تفاعل تسلسلي. وكانت عملية إنجاز فصل النظير المشع بتراكيز كافية العائق التكنولوجي الواجب تخطيه خلال مراحل إنتاج القنبلة الذرية.

لقد بحثنا بإيجاز في الفصل السابع تخصيب خام اليورانيوم الطبيعي. فالتراكيز الطبيعية لـ ^{235}U في خام اليورانيوم أقل من أن تديم تفاعلاً تسلسلياً في مفاعل ماء خفيف ومعظم المكون ^{238}U غير انشطاري. ويمكن زيادة تركيز ^{235}U من خلال عملية التخصيب بواسطة عملية تدعى الانتشار (Diffusion)، أو من خلال أساليب تكنولوجية متقدمة أخرى. وكانت طريقة الانتشار التي طورت في البداية على نطاق واسع لأول مرة في أوك رج في ولاية تينيسي خلال الحرب العالمية الثانية تمثل جهداً صناعياً عظيماً ذا مستوى تقني رفيع لم تستطع تقليده إلا دول قليلة جداً. وتبقى عملية التخصيب عائقاً تكنولوجياً لأي بلد يحاول إنجاز تفاعل تسلسلي مع اليورانيوم.

8- كان الكدس المهدأ بالكربون وهو طراز بدائي من مفاعل قد عرض من قبل الفيزيائي الشهير إينريكو فيرمي في جامعة شيكاغو عام 1941. ويتلاءم هذا الانجاز مع النمط الكلاسيكي لتطور تكنولوجيا جديدة فقد كان البرهان العلمي للقاعدة (انظر الفصل العاشر).

وهنالك في الحقيقة بديل لعملية التخصيب. فمفاعل CANDU أو مفاعل الماء الثقيل يتيح حدوث تفاعل تسلسلي لخام اليورانيوم الطبيعي. فالماء الديوتيري (أي الماء الثقيل) يقوم بعملية تهدئة طاقة النيوترونات بصورة أكفأ من خلال الإمساك بعدد أقل من النيوترونات وبذلك يترك عدداً أكبر منها للمساهمة في التفاعل التسلسلي الانشطاري[9]. لكن التخلص من عملية التخصيب لا يوفر الحل لمشكلة انتشار الأسلحة، لأن مفاعلات الماء الثقيل مثل مفاعلات الماء الخفيف تولد البلوتونيوم. ولأن فصل البلوتونيوم من وقود المفاعل المستنفد عملية بسيطة نسبياً[10]، فلا توجد لدى أي دولة عوائق تكنولوجية أخرى تمنعها من حيازة مواد من مرتبة الأسلحة (أي مواد ذات تركيز عال من النوى الانشطارية).

حاولت ألمانيا خلال الحرب العالمية الثانية بناء سلاح انشطاري بواسطة إنتاج ماء ثقيل لتوليد البلوتونيوم. ولو تمكنت قوى المحور من تخطي هذا العائق أولاً لكانت امتلكت الوسيلة لإنتاج قدر كافٍ من البلوتونيوم لسلاح نووي، وكان يمكن بواسطته أن تربح الحرب.

وما زالت هاتان التقنيتان اليوم، أي التخصيب أو الماء الثقيل، مفتاح الطاقة النووية أكان ذلك للأغراض السلمية أم غير السلمية. وتمتلك دول عدة متطورة – فرنسا وبريطانيا والولايات المتحدة والاتحاد السوفياتي – القابلية على صناعة كل من مفاعلات القدرة النووية والأسلحة النووية. وقد قامت بضعة دول نامية ومنها الصين والهند بتفجير أسلحة نووية، لكنها تجد أن شراء مفاعلات القدرة التجارية من الدول المتطورة أمر ضروري. ومع ذلك فهناك دول أخرى مثل ليبيا و«إسرائيل» والعراق وإيران وباكستان وكوريا الشمالية وتايوان تطمح إلى امتلاك الأسلحة النووية. وهناك أخيراً بضعة دول متطورة مثل كندا وألمانيا الغربية وإيطاليا وسويسرا وهولندا والسويد ممن لديهم إمكانيات نووية متطورة جداً حتى أن بعضها يصدرها، لكنهم اختاروا عدم تصنيع أسلحة نووية حتى الآن.

9ـ إن إنتاج الماء الثقيل بحد ذاته يعتبر عائقاً تكنولوجياً صعباً.

10 ـ إن عملية فصل البلوتونيوم عملية أبسط جداً من عملية التخصيب. فهي لا تتضمن سوى تفاعلات كيميائية لفصل البلوتونيوم وهي ذرة مميزة تقوم بالاتحاد لتكوين مركبات مميزة في حين يتطلب التخصيب فصل نظيرين للذرة نفسها يقومان بالدخول في نفس التفاعلات.

ويبدو أن هناك عدداً من الدوافع وراء امتلاك دولة ما للتكنولوجيا النووية (Greenwood, Feiveson and Taylor, 1977). كما يبدو في بعض الحالات أن تلك قضية اعتبارية ليس إلاّ، غير أن الدوافع في حالات أخرى هي متطلبات الأمن القومي أو الرفاه الاقتصادي. ومن الواضح أن هذا ينطبق على امتلاك الأسلحة النووية أو مفاعلات القدرة. فقد تشعر أمّة ما أنها من غير مصادر وقود أحفوري يصبح استقلالها مهدداً باعتمادها الكبير على مصدرّي النفط والفحم. ومهما كانت الدوافع، فإن انتشار المنشآت النووية والذي يتضمن إمكانية صنع أسلحة، قد دق ناقوس الخطر للمجتمع الدولي.

وقد قامت 89 دولة عام 1968، بعد عدة سنين من التفاوض والنقاش، بتوقيع معاهدة منع انتشار الأسلحة النووية (NPT) بالإضافة إلى اتفاقية منع انتشار الأسلحة النووية (أو معاهدة تلاتيلولكو) التي وقعتها أربع وعشرون دولة في أميركا الجنوبية والوسطى بدءاً بعام 1973. وتعلن هذه المعاهدة الجزء الجنوبي من نصف الكرة الغربي منطقة «خالية نووياً». وتشمل معاهدة منع انتشار الأسلحة النووية (NPT) أكثر من 125 موقعاً بما فيها القوى الكبرى. وتتعهد كل دولة توقع المعاهدة ممن تمتلك أسلحة نووية بعدم تجهيز أي أسلحة أو وسائل تصنيع أسلحة إلى الدول غير النووية وتوافق الدول غير المالكة لأسلحة نووية على عدم استلام أو امتلاك مثل هذه المعدات أو التكنولوجيا. ولغرض مراقبة أي مخالفة للمعاهدة اتفقت كل الدول الموقعة على نظام دولي لمراقبة المنشآت النووية.

وقد جرى وضع هذا النظام من قبل الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) وفي منظورها الأهداف التالية: «اكتشاف أي تحويل لكميات ذات شأن من المواد النووية من الفعاليات النووية السلمية إلى صنع الأسلحة النووية في الوقت المناسب... وردع مثل هذا التحويل من خلال الاكتشاف المبكر».

والعبارة الحاكمة في هذا البيان هي اكتشاف في الوقت المناسب. ويشير اكتشاف في الوقت المناسب إلى إمكانية البلد الوشيكة على تجميع كتلة حرجة من مادة انشطارية. وتعتمد الامكانية الوشيكة لبلد أو منظمة سرية لإنجاز ذلك على حاجتها إلى تخطي عوائق تكنولوجية رئيسة لصنع سلاح نووي. فإذا ما امتلك البلد مثلاً يورانيوم بتراكيز مخصبة أو بلوتونيوم معادة معالجته فالمسألة الوحيدة المتبقية هي

امتلاك كمية كافية من المواد على مستوى الأسلحة لتصنع قطعة سلاح واحدة أو أكثر. لكن كم هي كمية ذات الشأن من المادة المطلوبة؟

1 ـ بالنسبة إلى البلوتونيوم (^{239}Pu)

أ ـ الحجم المثالي لتكوين كتلة حرجة هو أربعة كيلوغرامات من البلوتونيوم النقي داخل قشرة من البريليوم العاكس للنيوترونات وسيكون قُطر الحاوية بحجم كرة بيسبول.

ب ـ ما هو أكثر من الناحية العملية وجود سموم ناتجة من العملية الانشطارية مثل (^{240}Pu) وذلك يتطلب كتلة أكبر لكن وجود الأكسجين يولد ضغوطاً تُقلل إلى حد ما من الكتلة المطلوبة. لذلك، ستكون كتلة 15.7 كيلوغرام من ثاني أُكسيد البلوتونيوم كافية لتعتبر كتلة حرجة.

ج ـ تعتبر الوكالة الدولية للطاقة الذرية مقدار 8 كيلوغرام من ^{239}Pu كمية «ذات شأن».

2 ـ بالنسبة إلى اليورانيوم عالي التخصيب أي (^{235}U).

أ ـ تعتبر كمية 15 كيلوغراماً من يورانيوم مثالي (مخصب بنسبة 100 في المئة) كتلة حرجة وهو بحجم بطيخة كبيرة.

ب ـ عند تخصيب اليورانيوم ^{235}U بنسبة 20 في المئة تكون الكتلة الحرجة لخليط اليورانيوم 250 كيلوغراماً.

ج ـ تعتبر الوكالة الدولية للطاقة الذرية كمية 25 كيلوغراماً من اليورانيوم المخصب بنسبة 25 في المئة ^{235}U «كمية ذات شأن».

3 ـ تعتبر الوكالة الدولية للطاقة الذرية كمية 8 كيلوغرام من ^{233}U وهو النظير الإشعاعي للثوريوم «كمية ذات شأن».

ويمكن تقدير مدى مسؤوليات الوقاية التي تضطلع بها الوكالة الدولية للطاقة الذرية بالرجوع إلى الجدولين 8-3 و8-4. لاحظ أن الوكالة الدولية مسؤولة عن أكثر من 700 منشأة نووية بما فيها منشآت تخصيب وعمليات إعادة معالجة. ومركز الوكالة هو في فيينا، وتستخدم نحو سبعمئة اختصاصي مهني تقريباً، وتبلغ ميزانيتها السنوية نحو 500 مليون دولار. وهناك، كما يبيّنه الجدول 8-5، بضعة أطنان من

البلوتونيوم المعزول واليورانيوم عالي التخصيب وكلاهما يعتبر مادة حربية مشمولة بنظام الوقاية الدولي. وينصب الاهتمام الأكبر على وسائط مناولة المواد السائبة (الجدول رقم 8-4) حيث توجد معظم هذه المواد.

الجدول 8-3: المنشآت النووية ضمن برنامج الرقابة التابع للوكالة الدولية للطاقة الذرية أو تلك التي تحتوي مواد ذات طبيعة خاضعة للرقابة في دول لا تمتلك أسلحة نووية.

نوع المنشأ النووي	الوضع في نهاية 1993		
	ضمن معاهدة NPT	خارج معاهدة NPT	المجموع
مفاعلات قدرة كهربائية	153	13	166
مفاعلات بحوث تجميعات حرجة	133	22	155
منشآت تحويل	7	4	11
منشآت تصنيع وقود	32	10	42
منشآت إعادة معالجة	5	1	6
منشآت تخصيب	5	1	6
منشآت تخزين منفصلة	39	5	44
منشآت من أنواع أخرى	56	3	59
المجموع الجزئي	430	59	489
مواقع أخرى	296	28	324
المجموع الكلي	726	90	816

كل هذه المنشآت تعمل تحت مظلة معاهدة وقف انتشار السلاح النووي (NPT) ومعاهدة تلاتيلولكو (أميركا الوسطى والجنوبية).

المصدر: التقرير السنوي للوكالة الدولية للطاقة الذرية 1993.

إن أسلوب العمل الأساسي للوكالة هو التحقق من كميات المواد النووية في كل منشأة تقوم بمراقبتها. وهناك نظام لاحتساب المواد يُعمل به في كل بلد مشارك. وتحتفظ الوكالة بتقييم مستمر للتفاوتات في هذه الحسابات ويدعى «تقييم المواد غير المعللة» (MUF) التي قد تؤشر انحرافاً محتملاً للاستخدام غير السلمي. ويعمل النظام مثالياً لإنتاج تحذيرات في الوقت المناسب عن وجود كمية ذات شأن من المواد التي يمكن استخدامها للأغراض الحربية (وتفترض المجموعة الدولية أن «الوقت المناسب» هو 7 إلى 10 أيام وهي الفترة الزمنية الصغرى اللازمة لتصنيع أداة انفجارية من المادة).

وقد تحدى النقاد الافتراض القائل إن الرقابة التي تفرضها معاهدة وقف الانتشار

توفر رقابة فاعلة ضد انتشار الأسلحة النووية. ويدّعون، اعتماداً على أُسس تكنولوجية أن رقابة الوكالة غير فعالة بسبب الإغفال (انظر: Bulletin of Atomic Scientists, October 1981, and December 1988). فهي على سبيل المثال لا تقوم بتفتيش منشآت معالجة اليورانيوم الخام. كذلك يحاسب آخرون الوكالة على منهجيتها الحسابية. وقد اتهمت بأن الإجراءات غير المتكاملة لا تتيح من الناحية المنطقية الاستنتاج القائل إن غياب الأدلة الإحصائية عن المواد غير المعللة يعني عدم وجود أي انحراف.

أشار النقاد أيضاً إلى مشاكل مؤسساتية وأخرى سياسية تتعلق بمعاهدة وقف انتشار الأسلحة النووية. وتتعلق هذه المشاكل بمسألة السيادة الوطنية المهيمنة. ويستطيع أحد البلدان المضيفة تأخير التفتيش الموقعي للتغلب على التحذيرات المؤقتة. والأكثر أهميةً هو أن الدول ذاتها تقرر أياً من المنشآت يمكن أن تخضع لتفتيش الوكالة. وبذلك توفر الإمكانية لمشاريع سرية منفصلة تنتج مواد خاصة بالأسلحة (إذ إن مفاعلات البحوث تنتج الأسلحة من البلوتونيوم باستخدام خام يورانيوم غير محتسب). والوكالة محددة أيضاً في إمكانيتها على فرض الإذعان للمعاهدة أو منع أحد الدول الموقعة من الانسحاب منها أو لإجبار أي بلد على توقيعها.

بسبب مشاكل صعوبة تطبيق برامج التفتيش، راح بعض الخبراء يحثون على التحول إلى دورة وقود تستخدم الثوريوم كحل تكنولوجي. والثوريوم كما أشرنا خام طبيعي مبتذل لا تنتج عنه نفايات ذات نظائر انشطارية قابلة للفصل موازية للبلوتونيوم، إذ إنه يتيح تغيير طبيعته بطريقة بسيطة تعيق استخدامه كسلاح. وقد كان هناك تأييد متحمس لدورة الثوريوم في الأصل. ولم يتبع ذلك أي تبن لها. والمانع الأساسي الذي يعيق ذلك هو الاستثمار الهائل على المستوى العالمي في دورة وقود اليورانيوم. غير أن دورة وقود الثوريوم ليست مضمونة في حد ذاتها. فهي عرضة للانحراف إلى الأسلحة عند مرحلة تلي التخصيب وتسبق عملية تغيير خواصها. والأهم هو أن الخبراء باتوا يعتقدون بقدرة العديد من الدول عبر العقدين القادمين على تطوير إمكانيات جديدة للتخصيب[11] وذلك ما يبطل عمل تغيير الخواص كأسلوب حماية في دورة الثوريوم.

11 ـ نالت تقنية التخصيب التي تعتمد على الليزر اهتماماً كبيراً من علماء البحث النووي في بداية السبعينيات. والفكرة هي إنجاز الفصل بين النظيرين (^{235}U و^{238}U) من خلال التأيين الانتقائي أو الفصل بواسطة أشعة ليزرية شديدة. ويمكن مثلاً للشعاع الليزري أن ينير بخار سادس فلوريد اليورانيوم (UF_6) وهو نفس مركب اليورانيوم المستخدم في تقنية الانتشار الغازي. وهذه الخطة فعّالة لأن الطول الموجي لليزر نقي بما فيه الكفاية ليميز بين الطيف الذري المختلف بصورة ضئيلة للنظيرين (انظر: Sproll, 1963). وتمتلك مصادر الضوء الأخرى حتى عندما تكون بالشدة نفسها مدى واسعاً من الأطوال الموجية لذا لا يمكنها التمييز بين النظيرين. وإذا ما وجِد أن هذه التقنية مجدية فبإمكانها=

الجدول 8-4: أمثلة من منشآت المناولة الكبيرة الخاضعة للتفتيش من قبل الوكالة الدولية للطاقة الذرية لعام 1979 (أ)

البلد	الاسم المختصر	الموقع	النوع
الأرجنتين	المنشأة الرائدة لتصنيع الوقود (HEU)	كونستوينتس	تصنيع الوقود
بلجيكا	بلنغونيوكليير BN -Mox	ديسل	تصنيع الوقود
البرازيل	منشأة ريسيندة لتصنيع الوقود	ريسينده	تصنيع الوقود
كندا	إي.أن.أل. بورت هوب	بورت هوب فارين	التحويل
	Westinghouse Fuel Fabrication Plant	جولك ريفر	تصنيع الوقود
جمهورية الصين	منشأة تصنيع الوقود INER	لونغ تان	تصنيع الوقود
	مصنع تحويل اليورانيوم	لونغ تان	التحويل
الدانمارك	قسم المتالورجي (المواد)	ريزو	تصنيع الوقود
ألمانيا الاتحادية	نيوكم NUKEM	ولفغانغ هانو	تصنيع الوقود
	GWK - WAK	كارلسروة	إعادة المعالجة
	يورانيت (Uranit)	يوليش	تخصيب
الهند	مجمع الوقود النووي	حيدر آباد	تصنيع الوقود
	PREFRE	تارابور	إعادة المعالجة
إيطاليا	فابنوك – بوسكو مارينغو	اليساندريا	تصنيع الوقود
	يوريكس EUREX	سالوجيا	إعادة المعالجة
اليابان	إعادة معالجة PNC	توكاي – مورا	إعادة المعالجة
	(كوماتوري –1)NFI	توكاي مورا	تصنيع الوقود
	SMM (توكاي –1)	كوماتوري، أوساكا	التحويل
هولندا	نبذ فائق	الميلو	تخصيب
إسبانيا	منشأة المتالورجي (المواد)	مدريد	تصنع الوقود
	مركز خوان فيغون للبحوث	مدريد	إعادة معالجة
السويد	آسيا – أتوم ASEA - ATOM	فاستيراس	تصنيع الوقود
المملكة المتحدة	منشأة إعادة المعالجة PFR	دونراي	إعادة معالجة

(أ) يشمل ذلك منشآت التحويل ومنشآت تصنيع الوقود والمنشآت الكيميائية لإعادة المعالجة والمنشآت الرائدة التي يتجاوز خزينها كيلوغراماً واحداً فعالاً.

المصدر: مطبوعة بإذن من. *Bulletin of the Atomic Scientists, a Magazine of Science and World affairs* Copyright© 1986, 1982 by the Educational Foundation for Nuclear Science,6042 South Kimbark Avenue, Chicago, Illinois 60637, U.S.A.

= تصغير حجم منشأة التخصيب. وقد أثار هذا خوفاً من انتشار معامل سرية للتخصيب في أي موقع في العالم. وعلى أي حال، فإن التقنية بحاجة إلى طرق معالجة معقدة جداً مما أبقاها في المختبرات البحثية فقط. غير أن التقدم السريع في تكنولوجيا الليزر لا يترك مجالاً يضمن أن لا تصبح هذه التقنية متيسرة عمّا قريب.

الجدول 8-5: كميات المواد النووية تحت رقابة الوكالة الدولية للطاقة الذرية في الأقطار التي لا تمتلك أسلحة نووية (بالأطنان)

المادة النووية	1975	1980	1993
البلوتونيوم المفصول	2	5	37
في الوقود المشعع	15	78	414
المجموع	17	83	451
يورانيوم مخصب إلى 20 في المئة أو أكثر	4	11	10
يورانيوم مخصب أقل من 20 في المئة	3091	13872	38724
مواد المنشأ (يورانيوم طبيعي أو مستنفد وثوريوم)	4440	19097	86156

المصادر: التقارير السنوية للوكالة الدولية للطاقة الذرية، 1980، 1993. مقتبسة من: Bulletin of the Atomic Scientists 1986.

وربما لن يكون بإمكان التكنولوجيا تقديم حل لهذه المشكلة لأنها سياسية أكثر منها تكنولوجية. وقد نُظر إلى معاهدة وقف انتشار الأسلحة النووية أساساً كإنجاز سياسي في المقام الأول والسلبيات الحالية في المعاهدة هي أيضاً سياسية. وربما سيكون الحل إذا ما تم العثور عليه سياسياً أيضاً.

ومما يتوجب ملاحظته هو أن أحد الدوافع الأساسية لموافقة الأمم غير النووية على معاهدة NPT هو ضمان انتقال تكنولوجيا توليد الكهرباء باستخدام الطاقة النووية إليها. فلم تكن ترغب بالبقاء خالية الوفاض نووياً. وتوضح هذه الحقيقة المؤثرة الطبيعة السياسية للقضية بصورة جيدة (Yager, 1974, and Greenwood [et al.], 1977).

تقنية المفاعل المولد (مفاعل القدرة)

يمكن أن تتعقد قضية الانتشار النووي بدرجة أكبر إذا ما اختارت كثير من الدول التقنية الانشطارية والمدعوة المفاعل المولد (Breeder Reactor) التي ما زالت تجريبية. فمفاعل الماء الخفيف LWR الأنموذجي الذي رأيناه في الفصل السابع هو ما يدعى بالمفاعل الحارق (Burner Reactor). فالمواد الانشطارية تنفلق محررة طاقة لمحطة توليد الكهرباء وبذلك تُستهلَك النوى بالطريقة نفسها التي يحترق بها الوقود

القابل للاحتراق. ومن ناحية أخرى يولد «المفاعل المولد» نوى انشطارية جديدة كمنتج عرَضي، ويفعل ذلك بصورة أسرع من استهلاكه النوى لتوليد القدرة.

إن إنتاج ^{239}Pu انشطاري من ^{238}U في مفاعل نووي يعرف بطريقة أدق بعملية التحويل (Conversion) وبعض المفاعلات مصممة كمفاعلات تحويل، ما يعني أن الغاية الأساسية منها هي إنتاج البلوتونيوم من اليورانيوم. وقد صممت هذه المفاعلات أساساً لإنتاج مواد الأسلحة النووية، ويوجد عدد منها في الولايات المتحدة[12].

لذا نستطيع التمييز بين ثلاثة أنواع من المفاعلات الانشطارية. ورغم أنها كلها تولد الحرارة وتولد البلوتونيوم إلا أن كلاً منها يؤكد بعض الخصائص في التصميم:

1 ـ مفاعل الماء الخفيف (LWR) أو المفاعل الحارق وهو مصمم بأعلى كفاءة لتوليد القدرة الكهربائية.

2 ـ المفاعل المولد – وهو مصمم لتحقيق نمو صافي في المادة الانشطارية مع إنتاج قدرة كهربائية.

3 ـ مفاعل التحويل (من النوع العسكري) – وهو مصمم لإنتاج الحد الأعلى من البلوتونيوم بغض النظر عن إنتاج القدرة.

ويحدث التوليد في أي من هذه المفاعلات من خلال قصف نوى ^{238}U بالنيوترونات المتحررة من عملية الانشطار. ويولد انشطار أي من ^{235}U أو ^{239}Pu في أي مفاعل نووي نيوترونات عالية الطاقة يصطدم بعضها بنوى ^{238}U ويجري امتصاصها فيها. وتتحول هذه النوى بعد 2.3 يوم إلى ^{239}Pu من خلال عملية التحلل الإشعاعي.

ويحدث التحول في المفاعل الحارق كحالة عرضية لإنتاج القدرة الكهربائية. أما في مفاعل التحويل فالهدف هو اختلاق نظير انشطاري (بلوتونيوم) من دون الحاجة للتخصيب. وكما لاحظنا، فإن التخصيب عملية معقدة، في حين أن فصل البلوتونيوم أمر سهل نسبياً.

ويجري إنتاج عدد أكبر من نوى ^{239}Pu في كل من مفاعل التحويل والمفاعل المولد

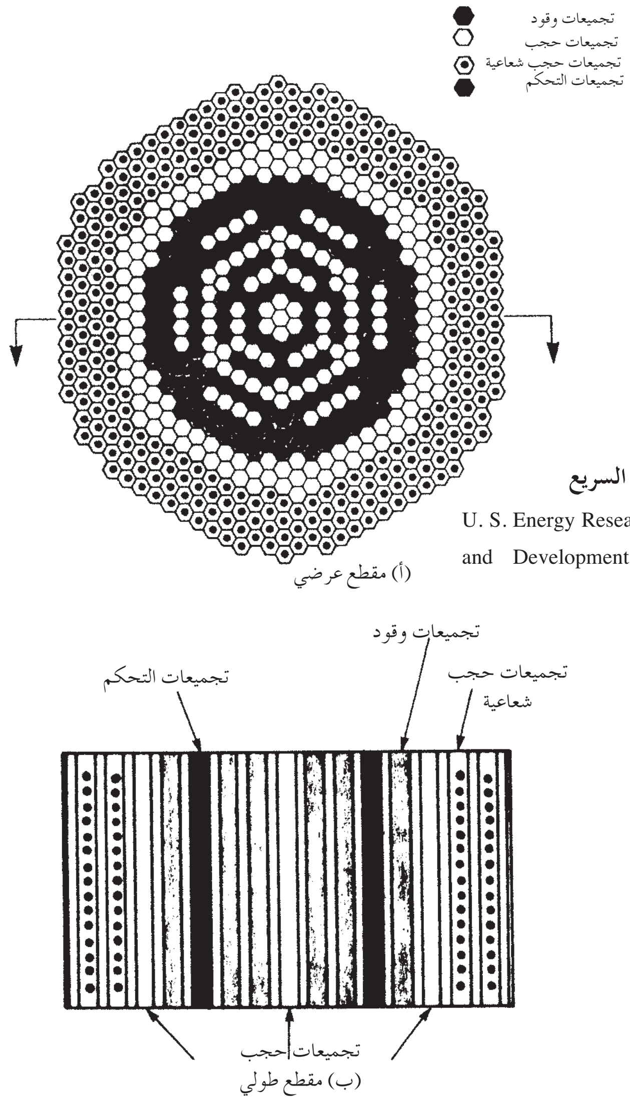
12 ـ تشغل حكومة الولايات المتحدة المفاعلات لتوليد البلوتونيوم للأسلحة النووية في هانفورد في ولاية واشنطن وفي سافانا ريفر في جنوب كارولينا. وأحد المفاعلات المسمى مفاعل - N من النوع المهدأ بالغرافيت والمبرد بالماء يشبه المفاعل الذي انفجر في تشرنوبل. وقد جرى إيقاف كثير من مفاعلات إنتاج السلاح في السنين الأخيرة بسبب الاهتمام بالسلامة.

من عدد نوى ^{235}U المستهلكة. وهذا ممكن لأن اليورانيوم يحتوي عدداً أكبر جداً من نوى ^{238}U مقارنة بـ ^{235}U، وهناك أكثر من نيوترون واحد على المعدل يتحرر لكل حالة انشطار. ويمكن كبديل تحميل ^{239}PU، الذي تحول سابقاً من اليورانيوم كمادة إضافية انشطارية وفي هذه الحالة يقوم اليورانيوم بتوليد يورانيوم أكثر. ويجري في أي من الحالتين إزالة مزيج التوليد (من اليورانيوم والبلوتونيوم) من المفاعل عندما يكون خليط المادة الانشطارية (كل من ^{235}U و^{239}Pu) قد تنامى إلى الجزء المطلوب.

ويبين الشكل 3-8 أ مقطعاً لقلب المفاعل المولد. وتمثل كل مساحة سداسية صغيرة تجميعة من قضبان من نوع أو آخر كما مؤشر. والتجميعات المغطاة (الغامقة) هي قضبان من اليورانيوم تتعرض للقصف بنيوترونات ناتجة عن الانشطار. ويمكن تحميل قضبان التجميعة المغطاة باليورانيوم الطبيعي لبدء عملية التوليد. لاحظ أن القضبان المغطاة تحاط بدورها بحلقات متتالية من تجميعات الوقود التي تحتوي المادة الانشطارية اللازمة لتعريض كل تجميعة مغطية إلى مجالات شديدة من نيوترونات الانشطار. هناك أيضاً تجمعيات للتحكم تمتص النيوترونات ويمكن إدخالها أو سحبها كما في مفاعلات الماء الخفيف. ويحيط بكل مجموعة وقود، وغطاء محيطة، وقضبان تحكم، حلقة من قضبان حاجبة للإشعاع لامتصاص النيوترونات عالية الطاقة التي تهرب من الاصطياد داخل القلب.

ويمكن تبريد قلب المفاعل المولد من خلال جريان مائع التبريد على جوانب القضبان، بنفس الطريقة التي يستخدم بها الماء في مفاعلات الماء الخفيف تقريباً. أما بالنسبة إلى المفاعل المولد فلا يتوقع على أي حال أن يكون الماء هو مائع التبريد. وتستخدم مفاعلات التوليد المصممة في الولايات المتحدة وفي فرنسا الصوديوم المنصهر كمبرد، وتدعى بمفاعلات التوليد السريعة المبردة بالمعدن المنصهر (Liquid Metal Fast Breaeder Reactors) أو (LMFBR). ويتدفق الصوديوم المنصهر على طول تجميعات قضبان قلب المفاعل لتبريدها كما هو مبين في الشكل 8-3. أُختير الصوديوم كمبرد لهذه المفاعلات بسبب خواصه الممتازة كمبادل حراري وبسبب إمكانية عمله في درجات حرارية عالية (600° إلى 700° مئوية)[13] بحالته المنصهرة من

13 ـ ينصهر الصوديوم عند درجة 98° (مئوية) ويصل حد الغليان عند درجة 903° مئوية.



الشكل 8-3:
قلب مفاعل التوليد السريع
مقتبس من: U. S. Energy Research and Development Administration (1975).

دون الحاجة إلى الضغط العالي للبخار. وبذلك يقلل الضغط الواطئ فرصة وشدة انفجار الأنبوب الذي يعمل بضغطٍ عالٍ. وللصوديوم من ناحية أخرى عدد من السلبيات. فهو يصبح ذا إشعاعية شديدة بعد تعرضه للقصف النيوتروني إضافة إلى نشاطه الكيميائي. فهو يتوهج ملتهباً عند تماسه مع الهواء، كما يمكن أن ينفجر عند امتزاجه بالماء.

وتمثل المجموعة الكاملة أو حتى مجموعة فرعية من قضبان وقود المفاعل المولد كتلة حرجة حين تسحب كل قضبان الوقود. ويعد مزيج الوقود للمفاعل المولد أكثر تخصيباً عادة من مفاعل الماء الخفيف رغم أن التخصيب ليس مرتفعاً إلى درجة التخصيب المستخدمة في الأسلحة النووية. فالتخصيب العالي والتكديس الكثيف لقضبان الوقود والقضبان المغطاة ضروريان لحصول حالة الحراجة من دون الحاجة إلى وسط مهدئ، ولتوفير دفق نيوتروني كثيف يعتبر ضرورياً للتوليد. وهذه الكثافة العالية للمادة الانشطارية يمكن على أي حال عندما تأخذ سوية مع خلفية من نيوترونات الانشطار (انظر الفصل السابع) أن تفضي إلى نتائج مدمرة.

لقد أدرك مطورو المفاعلات المولدة السريعة في مرحلة مبكرة، أن لقلب المفاعل المولد إمكانية كبيرة للحوادث المدمرة، مقارنة بالمفاعلات المهدئة. وقد عانى من مفاعل مولد تجريبي (EBR - I) في الولايات المتحدة مبكراً من انصهار جزئي لقلبه عام 1955 عندما سُمح له من دون قصد أن ينساق إلى حالة سببت ارتفاعاً في درجة حرارة القلب وهو ما سبب بدوره زيادة في وتيرة التفاعل (أي زيادة في الفيض النيوتروني). ويسمى هذا التأثير معامل درجة الحرارة الإيجابي (Positive Temperature Coefficient)، ويحدث عندما يدفع التمدد الحراري قضبان الوقود إلى بعضها بعضاً ويقلص المسافات بينها. وقد عانى مفاعل مولّد سريع آخر وهو مفاعل إينريكو فيرمي انصهاراً جزئياً عام 1956 عندما توقف جريان الصوديوم المبرِّد نتيجة حادث عرضي نجم عن صفيحة معدنية غير مربوطة جيداً. وقد أعلنت حالة الطوارئ الإشعاعية في المنشأة في ديترويت، غير أن أغلبية التلوث الإشعاعي تقريباً تم احتواؤه داخل بناية الاحتواء (انظر: Collier and Hewlett, 1987). وقد أدرك مطورو المفاعل المولد السريع خلال هذه الفترة أن المفاعلات الأكبر حجماً من المفاعل التجريبي أو مفاعل فيرمي يمكن تصورياً أن تعاني من حالة حرجة أكثر عنفاً وتدعى انهيار القلب (Core Collapse) أو حادث تمزق القلب (Core Disruption Accident) انظر (Collier and Hewlett, 1987).

وبحسب التنظير يمكن لهذه الحادثة أن تحصل عندما تِسبب إعاقة جريان المبرِّد انصهار قضبان الوقود في جزء من القلب، وذلك ما ينتج منه انهيار المادة الانشطارية في الجزء الأسفل من المفاعل. ويمكننا باستخدام الشكل 8-3 (ب) تصور انصهار

عدد من قضبان الوقود في مواقع متجاورة، في منتصف ارتفاع المفاعل. وأن القضبان أصبحت كتلة منصهرة في تلك المنطقة ثم بدأت بالجريان إلى الجزء السفلي. إن نتيجة جمع كتلتين قابلتين للانشطار في حالة دون الحرجة، من غير قضبان تحكم، يكوّن كتلة حرجة فورية. ولن تنفجر هذه الكتلة من أغلب الاحتمالات بقوة انفجار سلاح نووي (الذي صمم لحالة فوق حرجة قصوى)، لكنها ستكون حادثة أعنف جداً من انصهار غير انفجاري، وهو أسوأ نوع من الحوادث التي قد يعاني منها مفاعل الماء الخفيف.

وينبغي ألا يغيب عن الذهن أيضاً أن صوديوم التبريد في مفاعل LMFBR يمكن أن يولد معامل فراغ إيجابي كما هي الحالة مع مفاعلات الماء الخفيف المهدأة بالغرافيت من نوع مفاعل تشرنوبل. وهكذا فبإمكان ارتفاع فجائي في توليد الحرارة في أحد أجزاء المفاعل أن يسبب غلياناً محلياً لصوديوم التبريد الذي يؤدي مع مرور الوقت إلى نشاط تفاعلي أكبر، أي بمثابة دورة تغذية مرتجعة إيجابية تؤثر في توليد الحرارة.

وهناك في المفاعلات المولدة، إضافة إلى المخاطر التشغيلية، قضية الرقابة. وهي قضية فائقة التعقيد. فالهدف الأول للمفاعل المولد هو توليد أكبر كمية من البلوتونيوم، الأمر الذي سيزيد من الكميات التي يمكن أن تحول للاستخدام في تصنيع الأسلحة بصورة هائلة. وهذا ما سيزيد أيضاً من خزين البلوتونيوم المفصول بصورة كبيرة، ويضع جهوداً كبيرة جداً على نظام الرقابة والتفتيش.

كما إن الكلفة الأولية للمفاعلات المولدة أكبر بكثير من كلفة مفاعلات الماء الخفيف. غير أن بعض دعاتها رغم ذلك، يرون في تكنولوجيتها فوائد اقتصادية. والحقيقة أن الدعاة الأوائل اعتقدوا بما سموه (اقتصاد البلوتونيوم) (انظر: Häfele, 1981). وكان اقتصاد البلوتونيوم سيصبح نظاماً شاملاً للمفاعلات المولدة يزود البلوتونيوم الفائض كوقود للمفاعلات الحارقة. وكانت الكلفة الرأسمالية الإضافية للمفاعل المولد ستستوفى من مدخول بيع هذا الوقود الفائض. فكل مفاعل سيولد نحو 25 في المئة من الوقود أكثر مما استخدمه لتوليد القدرة الكهربائية. وسيجري استخلاص البلوتونيوم من قضبان وقود المفاعل المولد في منشآت إعادة المعالجة التي ستقوم أيضاً بفصل العناصر الانشطارية من الوقود المستنفد لمفاعلات الحرق (انظر الشكل 8-1). وسيمكن بواسطة مصدري البلوتونيوم هذين من توليد مقدار هائل من القدرة مع مدخول بسيط فقط من اليورانيوم البكر.

ورأى دعاة اقتصاد اليورانيوم في نظام للمحطات النووية من هذا النوع إجابة للعديد من المشاكل التي كان بعضها يبدو حاداً في الستينيات والسبعينيات (انظر: Staufer [et al.], 1977). ومن أحد هذه المشاكل النمو الكبير المتوقع للطلب على الكهرباء، الذي كان يعني حاجة سريعة لتوسيع أكبر في إمكانيات التوليد في بقية القرن العشرين. وبدا أن الحاجة للمفاعلات المولدة قد زادت عندما أصبح توليد الكهرباء من المحطات التي تستخدم النفط غالياً جداً أثناء أزمة النفط العالمية. أما التوليد بواسطة الفحم فهو ليس البديل المفضل للنفط حسب قول دعاة المولد السريع وذلك بسبب كثير من السلبيات في دورة الفحم بما في ذلك الأخطار المهنية أثناء استخراجه ومأزق ثاني أكسيد الكربون.

ويجب الإقرار بأن الدعوة إلى اقتصاد البلوتونيوم لم تكن مجرد دعوة لإضافة محطات توليد نووية جديدة، بل كانت بالأحرى رؤية لتوسع أكبر جداً للتكنولوجيا النووية في اقتصاد العالم كله. وقد حاول دعاة ذلك أن يبرهنوا على أن مصادر اليورانيوم الرخيص ستستنفد عما قريب إذا ما استمرينا ببناء مفاعلات قدرة كبيرة من نوع مفاعل الحرق. والشيء الثاني الذي ادعوه هو أن سعر الوقود المستند إلى اليورانيوم سينخفض وسيبقى كذلك من خلال استخدام أنظمة أكبر من مفاعلات التوليد والحرق. وسيؤدي تبني تكنولوجيا التوليد إلى توسعات هائلة في تطوير القدرة النووية.

غير أن خبراء آخرين اعترضوا، بعد أن قُدمت اقتراحات حول اقتصاد البلوتونيوم. فقد أدركوا الخطر المتأصل في الخزين الهائل من البلوتونيوم ومن عمليات إعادة المعالجة الواسعة التي ستنتشر في كل أرجاء العالم. وسرعان ما فقد السعي نحو المفاعلات المولودة زخمه. فبجانب المخاطر كان من الواضح أن العديد من افتراضات الدعاة الأوائل لم تتحقق. فالطلب على الكهرباء بدأ يتباطأ في نهاية السبعينيات (انظر الفصل الرابع). وتزايدت كلفة بناء المحطات النووية فوق المعدل العام للتضخم وبصورة كبيرة. وكان معلوماً أن المفاعلات المولدة تكلف أكثر من مفاعلات الماء الخفيف الاعتيادية. وقد أراد الرئيس كارتر في الولايات المتحدة مثلاً أن يلغي كلاً من إعادة معالجة الوقود النووي وتطوير المفاعلات المولدة[14].

14 - كان العمل قد بدأ عام 1972 لبناء مفاعل مولد سريع مبرد بالصوديوم (LMFBR) في كلينج ريفر في تينيسي. غير أن الرئيس كارتر مع الهموم التي برزت عن مشكلة انتشار الأسلحة النووية أعلن عزمه على إيقاف إعادة تدوير =

ومن ناحية أخرى استمرت فرنسا بتطوير تكنولوجيا المفاعل المولد، وسلسلة فينيكس من المفاعلات الريادية. وبدأ مفاعل فينيكس الأول الذي تبلغ سعته 270 ميغاواط (كهرباء) بالعمل منذ عام 1973، وبدأ المفاعل الأكبر المدعو سوبر فينيكس وقوته 1242 ميغاواط (كهرباء) بالعمل منذ كانون الأول/ ديسمبر عام 1986. وهذه الوحدات أنواع ريادية لعرض التكنولوجيا وكلفتها تبلغ بضعة أضعاف كلفة مفاعلات الحرق العادية من نفس السعة. وكان متوقعاً عند التخطيط لهذه المفاعلات وبنائها أن الكثير من نفس النوع ستتلوها في فرنسا. غير أن المشاكل التقنية مضافة إلى الكلفة العالية أجبرت فرنسا على إيقاف بناء المفاعلات المولدة كبيرة – الحجم خلال المستقبل المنظور*.

وإذا ما أعيد الاهتمام بتكنولوجيا المفاعل المولد وتطويرها فيحتمل أن يكون ذلك في فرنسا. فقد اتبع الفرنسيون سياسة لتحديد اعتماد بلدهم على النفط المستورد. فليس لديهم أي نفط، وقليل من الفحم فقط. وعندما يتحدثون عن برنامجهم النووي يقولون «ليس لدينا نفط ليس لدينا فحم، ليس لدينا خِيار». ولم يكن هناك معارضون نقاد أو احتجاجات عامة ضد البرنامج النووي الفرنسي كما حدث في ديمقراطيات غربية أخرى. وكان هناك اختلاف عام نادر بعد حادث تشرنوبل يتعلق بالإعلان عن تساقط المواد الإشعاعية.

غير أن أخطار تكنولوجيا المفاعل المولد والشكوك من حوله لا تزال قائمة. وفي حالة وقوع حادث كبير فسيكون تقديم الدعم لبرنامج المفاعل المولد أمراً مشكوكاً فيه.

= البلوتونيوم وعلى ضغطه لإيقاف العمل بمشروع LMFBR في كلينج ريفر. غير أن الكونغرس استمر بتمويله وتكلمت إدارة ريغان في أوائل 1980 عن إدامة التزامها بمشروع المفاعل المولد. لكن التمويل من الكونغرس تباطأ وجرى تأجيل المشروع عام 1983 إلى أجل غير مسمى.

* تبلغ نسبة التوليد لمفاعل فينيكس 12 في المئة أي أنه يولد 12 في المئة من البلوتونيوم أكثر مما يستهلك وقد استمر العمل به منذ عام 1973 غير أن استخدامه الرئيسي اعتباراً من عام 2004 كان لدراسة طرق تحول النفايات النووية مع استمرارية تجهيز بعض الكهرباء والمفاعل مدرج للإيقاف عام 2014.

أما مفاعل سوبر فينيكس الذي استمر بناؤه منذ عام 1974 لغاية 1981 فلم يدخل الخدمة حتى سنة 1986 ورغم أنه مصمم لإنتاج 1200 ميغاواط من الكهرباء إلا أن إنتاجه لم يتجاوز 25 في المئة من هذا المعدل. وكان المفاعل يعاني حتى عام 1996 التآكل والتسرب في منظومة الصوديوم المسال. وبعد إصلاح هذه المشاكل تمكن المشغلون من إيصال قوة المفاعل إلى نحو 90 في المئة من قوته التصميمية. غير أن المفاعل أوقف في أيلول/ سبتمبر 1998 بعد عدة حوادث أدى آخرها إلى توقف أوتوماتيكي. ولم يعمل المفاعل منذ ذلك التاريخ بسبب المشاكل الفنية وأيضاً بسبب المعارضة الكبيرة التي واجهته من المجموعات البيئية والسياسية.

مراجع

Carter, L. J. *Nuclear Imperatives and the Public Trust: Dealing with Radioactive Waste*. Washington, DC.: Resources for the Future, 1987.

Collier, J. G. and G. F. Hewitt. *Introduction to Nuclear Power*. New York: Hemisphere Publishing, 1987.

Deese, W. *Nuclear Nonproliferation: The Spent Fuel Problem*. New York: Pergamon Press, 1983.

Greenwood, T., H. A. Feiveson and T. B. Taylor. *Nuclear Proliferation Motivations, Capabilities and Strategies for Control*. New York: McGraw-Hill, 1977.

Grossman, P. Z. and E. S. Cassedy. «Cost-Benefit Analysis of Nuclear Waste Disposal: Accounting for Safeguards.» *Science*, Technology and Human Values: vol. 10, no. 4, Fall 1985. pp. 47-54.

Häfele, H. Energy in a Finite World: *Paths to a Sustainable Future*. Cambridge, MA: Ballinger, 1981.

Kasperson, K. E. (ed.). *Equity Issues in Radioactive Waste Management*. Cambridge, MA.:Oelgeschloger, Gunn & Hain, 1983.

Lipschutz, R. D. *Radioactive Waste – Politics, Technology, and Risk*. Cambridge, MA: Ballinger, 1980.

Lovins, A. B., L. H. Lovins and L. Ross. «Nuclear Power and Nuclear Bombs.» *Foreign Affairs*: vol. 58, Summer 1980. pp. 1137-1177.

Murdock, S. H., F. L. Leistritz and R. R. Hamin (eds.). *Nuclear Waste: Socioeconomic Dimensions of Long-Term Storage*. Boulder, CO.: Westview Press, 1983.

Partridge, E. (ed.). *Responsibilities to Future Generations*. Prometheus Books. New York: Buffalo, 1981.

Rochlin, G. I. «Nuclear Waste Disposal: Two Social Criteria.» *Science*, January 7 1977. pp. 23-31, . «The Politics of Nuclear Proliferation.» *The Center Magazine*. University of California at Santa Barbara, May/ June 1980.

Sproull, R. L. *Modern Physics: The Quantum Physics of Atoms Solids and Nuclei*. New York: Wiley, 1963.

Staufer, T., H. Wyckoff and R. S. Palmer. «To Breed or Not to Breed.» *Mechanical Engineering*: vol. 99, no. 2, February 1977. pp. 32-41.

Willrich, M. and T. B. Taylor. *Nuclear Theft: Risks and Safeguards*. Cambridge, MA: Ballinger, 1974.

Yager, J. A. Energy and U. S. Foreign Policy. Cambridge, MA.:Ballinger, 1974.

See also: Arms Control and Disarmament Agreements. Texts and Histories of Negotiations. US Arms Control and Disarmament Agency, Washington, DC, 1980 edition.

In addition, several articles appeared in the December, 1988 issue of *The Bulletin of the Atomic Scientists* concerning the IAEA safeguards operations and the Nuclear Non-proliferation Treaty (NPT).

See also special issue of *The Progressive* entitled «The H-Bomb Secret,» November 1979.

الفصل التاسع
اقتصاديات القدرة الكهربائية

مقدمة

كانت المسائل الأكثر تداولاً في العقود القليلة الماضية في النقاشات العامة التي تخص توليد القدرة الكهربائية تتعلق بالسلامة والأثر البيئي. غير أن توليد القدرة الكهربائية له أهمية اقتصادية هائلة أيضاً. خذ بالحسبان فقط أن القدرة المولدة في الولايات المتحدة عام 1993 بلغت نحو 3 تريليون كيلواط– ساعة من الكهرباء، جرى توليدها وبيعها إلى ملايين الزبائن للاستهلاك المنزلي والتجاري والصناعي. وقد كلفت الكهرباء هؤلاء الزبائن الذين اعتادوا على قوة كهربائية موثوقة وقليلة الكلفة ما يقارب 200 مليار دولار، ناهيك بكلفة معدات توليد الكهرباء باهظة الثمن. وقد بلغت سعة القدرة الكهرباء المنصّبة في الولايات المتحدة عام 1993 ما يزيد على 700 مليون كيلوواط وهي تمثل استثماراً هائلاً فعلاً، ويمكن أن تكلف المحطات الكبيرة التي تستخدم الفحم (سعة مليون كليوواط) ما يزيد على ألف دولار لكل كيلوواط منصّب. وقد كلفت المحطات النووية المبنية في السبعينيات والثمانينيات نحو خمسة أضعاف هذا المبلغ وأدت في إحدى الحالات إلى إفلاس الشركة التي بنتها[1]. وحتى المولدات التي تعتمد توربينات الغاز والتي تعتبر رخيصة نسبياً تمثل استثماراً بعشرات الملايين. بالإضافة إلى ذلك، فإن أي محطة تعتمد الوقود الأحفوري أو النووي لتوليد القدرة تتطلب ملايين أكثر للوقود ولصيانة المحطة.

لقد كانت اقتصاديات القدرة الكهربائية رغم الكلف الهائلة المتضَمَنة، تعتمد على بعض الاقتراحات المنطقية واضحة المعالم. أولها أن الصناعة كانت تعتبر احتكاراً

1 ـ وصلت شركة نيوهامبشير للخدمة العامة عملياً إلى حد الإفلاس عند بناء محطة توليد القدرة النووية عند سي روك (Searock).

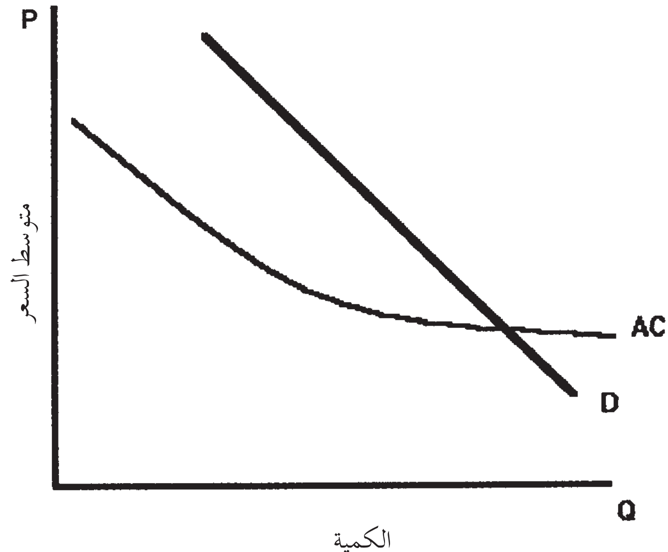
طبيعياً. والاحتكار الطبيعي هو الصناعة حيث يوجد ما يسمى (اقتصاد المقياس) منتشراً، وهذا يعني أن كلفة الوحدة (أو المتوسط) من الإنتاج تتناقص تدريجياً كلما زاد إنتاج الشركة (انظر الشكل 9-1). ولما كان متوسط سعري منفخض يسمح للشركة استيفاء أسعار أقل، كان بإمكان شركة واحدة كبيرة أن تخفض سعرها مقارنة بمجموعة من الشركات الصغيرة دائماً. وبسبب افتراض كون الصناعة احتكاراً طبيعياً فمن العادة وجود منتج واحد للقوة الكهربائية في منطقة أو ولاية من الولايات المتحدة[2]. وهذه الشركة كانت إما كياناً مملوكاً من قبل الحكومة أو مملوكة من قبل المساهمين (وهو الأغلب) ومنظمة من قبل وكالة حكومية (وعادة ما تكون حكومة الولاية) وتدعى هيئة المنافع العامة. وكانت مهمة الهيئة السماح لشركة الكهرباء أن تحقق ربحاً «عادلاً» في حين تحمي المستهلكين من قوة الاحتكار التي تستطيع الشركات ممارستها. غير أن الافتراض الأساسي كان السماح لشركة واحدة في الحصول على احتكار للسوق.

وبسبب اقتصاديات المقياس نفسه يقول الافتراض المنطقي الثاني إن الشركات الاحتكارية الكبيرة يجب أن تبني محطات طاقة مركزية كبيرة. والحقيقة أن حجج اقتصاديات المقياس إذا ما كانت صحيحة دوماً بالنسبة إلى إنتاج الكهرباء فستنطبق قاعدة «الأكبر هو الأفضل». فالمحطات الكبيرة والشركات المفردة يجب أن تعني أن بالإمكان تزويد كمية أكبر من الطاقة بأقل كلفة ممكنة. وهذا سيعني أن بإمكان المستهلكين أن يصرفوا أكثر على السلع وأقل على الكهرباء، كما سيكون بإمكان الأعمال والصناعات المعتمدة على القدرة الكهربائية إنتاج مادة أكثر بأسعار أقل وبذلك يفيدون الاقتصاد بمجمله.

ومع نهاية السبعينيات أصبحت قضية نوع وحجم محطة القدرة الواجب بناؤها أكثر تعقيداً. ورغم أن الفكرة عن اقتصاديات المقياس كانت لا تزال سائدة فقد تبين عدم كفاءة بعض أنواع المحطات الكبيرة من حيث الكلفة مقارنة بغيرها. ومع الارتفاع الفجائي في أسعار النفط والغاز الطبيعي، ومع فرض العديد من التعليمات حول البيئة ومع تجاوز الكلفة في بناء المحطات النووية بدأت المحطات الكبيرة

2 ـ هناك في بعض الأقطار شركة تجهيز كهرباء واحدة تغطي كامل القطر، وغالباً ما تكون مملوكة ومدارة من قبل الحكومة الوطنية.

بـأنـواعـهـا الـمـختلفة تعرض مـميزات كلفة مختلفة جداً. فإذا ما اختارت إحدى الشركات نوعاً من التكنولوجيا ولنقل توليد البخار في محطات موقدة بالفحم فيمكن أن تكون كلفة الإنتاج أعلى بكثير (أو أقل) من بديل آخر مثل استخدام الغاز الطبيعي اعتماداً على عوامل مثل كلف البناء والتعليمات الخاصة بالبيئة وسعر الوقود.



الشكل 9-1: السعر P مقابل الكمية Q لشركة احتكار طبيعي.

ملاحظة: متوسط الأسعار (AC) يهبط كلما ازدادت الكمية المنتجة (Q). ويجب في هذه الحالة أن تقوم شركة واحدة بتجهيز كل متطلبات السوق (Q). والسعر (P) الذي يمكن أن تفرضه شركة واحدة ليكون مربحاً سيكون أقل مما ستتقاضاه مجموعة من الشركات الأصغر.

لكن ذلك لم يكن ضمن هموم شركات توليد الكهرباء في الولايات المتحدة قبل عام 1970. فمعظم مصادر الطاقة كانت رخيصة ومبتذلة **أولاً**. وبدا أن كلفة الطاقة تتناقص بسبب الحجم فقط وكانت الكلفة الإجمالية (والأسعار للمستهلكين) تتناقص بصورة مستمرة[3]. والشيء **الثاني** هو أن هيئات المنفعة العامة كانت تسمح لشركات الكهرباء بصورة روتينية أن تستوفي سعراً للكهرباء الذي تجهزه يسمح لها باستعادة مجموع استثماراتها. وإذا ما كلفت إحدى المحطات أكثر قليلاً في بنائها فستزداد الأسعار بصورة تدريجية مع تأثير محدود في الزبائن وبطريقة تسمح باستمرارية الربح لشركة الكهرباء.

3 ـ تناقصت الأسعار ككلفة «حقيقية» بعد تعديلها بموجب نسب التضخم (انظر الفصل الرابع).

غير أن تسارع زيادة كلف الوقود والبناء غيّرت المناخ الاقتصادي والسياسي. ومع حلول عقد الثمانينيات لم توافق هيئات المنفعة العامة على منح شركات الكهرباء زيادة سعرية في كل طلباتها وبخاصة إذا ما كان القرار هو أن الشركة قامت ببناء محطة بطريقة غير حكيمة. وحتى عندما كان بإمكان شركات الكهرباء زيادة أسعارها لتغطية كلف أعلى فإن سعر الكهرباء ارتفع بصورة كبيرة، ما قلل الكمية المطلوبة وسبب تباطؤ التطور الاقتصادي مناطقياً وعلى مستوى البلاد جميعاً.

نتيجة ذلك أصبح اختيار نوع محطة التوليد الكهربائي من وجهة النظر الاقتصادية أمراً حرجاً. فشركات الكهرباء أرادت (وما زالت تريد) تطوير محطات الطاقة الكهربائية الأقل كلفة في بنائها وفي تشغيلها. لكن ما هو نوع هذه المنشأة؟ الإجابة عن هذا السؤال ليست سهلة بأي وسيلة. فلكي يقرر مجهزو الكهرباء أياً من المنشآت أقلها كلفة عليهم التفكير في الكلف عبر العمر الكلي للمنشأة، أي لعشرين أو ثلاثين عام مستقبلية. وقد أعطى مثل هذا التوقع حتى اليوم في أحسن الأحوال نتائج متباينة، وكان كل عامل في الكلفة يمكن تصوره من كلفة الوقود المستقبلي إلى كلفة التعليمات الخاصة بالبيئة عرضة للنقاش. غير أن بعض عناصره مثل كلفة التخلص من الوقود النووي المستنفد ليست في الوقت الحالي إلا حدسية. لذا فإن اختيار نوع المحطة التي سيجري إنشاؤها يمكن أن يكون صعباً وهناك حاجة إلى أن تقوم الشركات باستحصال أفضل تقييمات الكلفة الممكنة لكل أنواع المنشآت. وسننظر في القسم التالي كيف تقوم شركات تجهيز الكهرباء بحساب كلفة «دورة ـ حياة» محطات الطاقة.

لقد تمركز النقاش في الثمانينيات على الكلفة النسبية للمحطات الكبيرة التي تجهز الحمل الأساسي (انظر الفصل الثالث) البالغ بضع مئات من الميغاواط، على الأقل، وتركز بصورة خاصة على مقارنة كلفة المحطات النووية مقابل العاملة بالفحم[4]. وفي حين كان بعض الشك يعتري المسألة في بداية العقد تبين مع أواسط العقد وبصورة واسعة أن الفحم كانت له أفضلية واضحة من حيث السعر حتى عند أخذ عبء معدات مكافحة التلوث.

4ـ تمتلك محطات التوليد الكهرومائية الكبيرة أكبر أفضلية في الكلفة على المعدل. وكما لاحظنا في الفصول السابقة فإن الولايات المتحدة يمكن أن توسع السعة الهيدروليكية إلى حد ما. إنما لا تتوفَّر كمية كافية من القدرة الهيدروليكية للإيفاء بمجمل متطلبات القطر من الكهرباء.

غير أن اقتصاديات الطاقة الكهربائية قد أصبحت أكثر تعقيداً بقدر كبير في السنين القليلة الماضية. ففي حين يتميز الفحم بأنه الأفضل (من حيث الكلفة) مقارنة بالوقود النووي، اعتبرت تكنولوجيا الدورة المدمجة العاملة بالغاز الطبيعي (انظر الفصل الثالث) مؤخراً من قبل البعض، الأفضل من حيث الكلفة مقارنة بالمنشآت العاملة بالفحم أو بالطاقة النووية. هناك إضافة خيارات أخرى الآن ـ خيارات للمحطات المركزية الكبيرة ذاتها. فتحسين كفاءة استخدام الطاقة من قبل المستهلكين النهائيين مثلاً، قد يمثل أفضلية في الكلفة مقارنة بأي محطة مركزية جديدة وربما يكون الأرخص عدم بناء محطة جديدة، بل بالأحرى توفير حوافز للمستهلكين لكي يقللوا استهلاكهم.

والحقيقة أن الكثير تغير بحيث لم يجرِ إلا بناء القليل من محطات الطاقة المركزية من أي نوع في الولايات المتحدة مع أواسط التسعينيات ـ ولتوفير الطلب جرى ببساطة تجديد بعض المحطات القديمة وتحسينها ـ وتسمى صناعة الكهرباء ذلك أعادة تجهيزها بمصادر القدرة (انظر: Moore, 1995). غير أن سعة جديدة كانت توفرها أيضاً شركات لم تكن مجهزة تقليدية للكهرباء. وكانت هذه المجموعة من «مولدي الكهرباء خارج المرافق العامة» (NUG) تستفيد من القوانين الجديدة التي تتطلب من شركات تجهيز الكهرباء للمنفعة العامة أن تتقبل شبكة توزيع الطاقة المولدة من قبل أي جهة وتدفع لها سعراً عادلاً. وقد أصبحت هذه الشركات قطاعاً سريع النمو في إنتاج القوة الكهربائية في الولايات المتحدة ويتوقع لها أن تبقى كذلك.

ويشير نمو (NUG) إلى مقدار التغير الجذري في اقتصاديات الطاقة الكهربائية. فكون الأكبر هو بالضرورة الأحسن لم يعد مقبولاً. ولم يعد هناك إلا قليل من الناس ممن يعتقدون أن إنتاج الكهرباء هو احتكار طبيعي. فالمجهزون المستقلون الصغار الذين يستخدمون مولدات كهربائية صغيرة ـ نسبياً توربينات غازية أو ماكنات ديزل على الأغلب ـ قادرون على إنتاج القدرة الكهربائية بربحية، وقد يكونون قادرين على تحسين كلفة الشركات الكبيرة والمحطات المركزية العملاقة.

وقد أدخل هؤلاء المولدون المستقلون نوعاً من التنافس في الصناعة التي اعتبرت لمدة طويلة غير تنافسية تبعاً لتعريفها. غير أن هذا التنافس لا يبدو إلا البداية فقط. فربما نرى عما قريب تنافساً بين شركات التجهيز ذاتها. فإزالة القيود عن الصناعة يغير طريقة أداء شركات الكهرباء لأعمالها. وسننظر لاحقاً في هذا الفصل ما قد يعنيه ذلك لمستقبل اقتصاديات الطاقة الكهربائية.

احتساب كلفة الطاقة الكهربائية

احتلت الكلف الهائلة لبناء محطات الطاقة النووية عناوين الصحافة الأولى في السبعينيات والثمانينيات. غير أن البناء ليس إلا مكوناً واحداً من كلفة القدرة الكهربائية. ففي الستينيات ورغم أن المحطات النووية كانت أكثر كلفة من بناء محطات الفحم بدت أنها تملك فائدة الكلفة على الفحم. والنقطة ليست في أي نوع من المحطات يكلف أكثر بناؤها وإنما الأفضل من الناحية الاقتصادية عبر عمرها التشغيلي. ورغم أن كلفة البناء يجب أن تكون عاملاً في المعادلة إلا أن المشكلة الشاملة للمخططين هي تقدير كلفة إنتاج وحدة واحدة من الكهرباء، ومقدار الكهرباء (خلال السنة) التي يمكن لمنشأة واحدة إنتاجه.

والأكثر تحديداً ـ أن كلفة دورة الحياة تحتسب من دمج كلفة البناء الأصلية ـ أي الكلفة الرأسمالية ـ مع النفقات الجارية والمستقبلية للتشغيل والصيانة والوقود[5]. وهناك عامل آخر يجب اعتباره أيضاً وهو عامل تقني غير أنه ذو مترتبات اقتصادية مهمة: الكفاءة التشغيلية التي ستعمل المحطة بموجبها والذي يقاس عادة بقابليتها أو توفيريتها لتوليد الطاقة المصممة لإنتاجها بأكبر استمرارية ممكنة. وهذا ما يقاس كمّياً تحت تسمية عامل القابلية (Capacity Factor) أو عامل التوفرية* (Availability Factor). ويجب أخذ كل مكونات دورة الحياة في تحديد كلفة توليد القدرة الكهربائية كما يعبر عنها بالسنت لكل كيلوواط ـ ساعة (¢/kW-hr). ومع ذلك فإن كلاً من هذه العوامل قد يكون عرضة لمجهوليات كثيرة في التوقع حتى إن كان ذلك لبضع سنين قادمةٍ.

أما الكلف الرأسمالية ـ التشييد والمعدات ـ فسوف لا تبدو ظاهرياً كمشكلة، لأن أفقها الزمني أقل مما هو لكلف الوقود عبر عمر المحطة. فالأفق الزمني لتصميم

---

5 ـ يتضمن احتساب الكلف في حالة الطاقة النووية باباً لنفقات الإيقاف عندما تتوقف المحطة نهائياً عن العمل. ويتضمن الإيقاف في هذه الحالة التخلص من كافة المكونات التي أصبحت مشعة بصورة سليمة.

* هناك تعاريف في تشغيل محطات القدرة الكهربائية للمصطلحات التالية:

التوفرية (Availability) = عدد ساعات السنة – الساعات المخصصة للصيانة المبرمجة/ عدد ساعات السنة.

المعولية أو الموثوقية (Reliability) = (عدد ساعات السنة – الساعات المخصصة للصيانة المبرمجة) – ساعات إصلاح الأعطال غير المبرمجة / عدد ساعات السنة – الساعات المخصصة للصيانة المبرمجة.

المنفعة = Utilization (عدد ساعات السنة – الساعات المخصصة للصيانة – ساعات إصلاح الأعطال غير المبرمجة) – التوقفات الأخرى / عدد ساعات السنة– الساعات المخصصة للصيانة – ساعات إصلاح الأعطال غير المبرمجة.

المعدات ونصبها لمنشأة صغيرة تستخدم التوربين الغازي ومصممة لتوفير حمل الذروة الحمل الأوسط، يمكن أن يكون قليلاً نسبياً: فالمعدات قياسية ويمكن طلبها وتركيبها خلال أسابيع. غير أن محطات الحمل الأساسي تستغرق عادة بضع سنوات على الأقل لتنتقل من مرحلة التصميم إلى مرحلة الاشتغال. أما المنشآت النووية فكانت بالطبع مثالاً سيىء السمعة لأطوار بناء طويلة جداً استغرق بعضها أكثر من عقد ليكتمل. وحتى المحطة المصممة للحمل الأساس والعاملة بالفحم، أو المنشأة الكبيرة العاملة بالغاز ذات التوليد المزدوج، فما زالت تحتاج إلى خمس سنوات أو أكثر لتنتقل من لوحة التصاميم إلى العمل.

هناك الكثير من المجهوليات والعوامل التي يمكن أن تتغير بدرجة هائلة تجعل تقديرات الكلفة الرأسمالية غير دقيقة بعد بضعة أشهر من احتسابها. فتعليمات البيئة والسلامة الجديدة مثلاً قد تجعل تبديل التصاميم ضرورياً وتضيف الملايين إلى الكلفة الرأسمالية وسنيناً من الوقت التشغيلي. وهناك في معظم الأحوال نسبة الفائدة ـ وهي كلفة استدانة المال ـ التي يمكن أن تتبدل بصورة فجائية وكبيرة.

وكلفة الفائدة مهمة في هذا المجال لأن كلف رأس المال ليست إنفاقاً لمقادير كبيرة من النقد. فالنقود بالأحرى تستدان وتدفع عبر فترة زمنية. وفي حالة محطات حمل الأساس الجديدة سيجري دفع المبالغ عبر عقود. ويصبح إطفاء الدين لأي منشأة في الحقيقة كلفة مستمرة يعبر عنها على أساس السنت / كيلوواط – ساعة ككلفة ثابتة لرأس المال. وتلك النفقة الثابتة تتأثر بالطبع بكلفة استدانة النقد[6].

لكي تجمّع الموارد المالية المطلوبة لبناء محطة كهربائية، يجب استحصال ديون من البنوك و/ أو بيع الدين إلى المستثمرين[7]. وكلا النوعين من الدين يجب أن يدفعا مع

6 ـ تلتف بعض شركات الكهرباء على الشكوك والأعباء لكلفة بناء محطة من خلال بيع المنشأة والمعدات إلى مجموعات من المستثمرين أو المؤسسات المالية ثم تقوم باستئجارها منهم ثانية.

7 ـ تشمل أدوات الديون سندات التعهد والسندات التجارية وسندات الديون وتباع عادة في سوق السندات في نيويورك وفي البورصات الأميركية. وبعض أدوات الدين تدعمها رهونات، بينما تعتمد الأخرى على الدخل فقط. وتبيع سلطات شركات الطاقة العامة سندات الديون بنسب ربح أقل لأن المستثمر لا يدفع ضريبة دخل على الفائدة التي ربحها عن دين أصدرته شركة مملوكة حكومياً. ويمكن لشركات الطاقة المملوكة من قبل المساهمين الحصول على أموال من خلال بيع أسهم إضافية. وهذا يخفف من قيمة الأسهم المملوكة وإذا ما استخدم أكثر مما يجب فسيكون له تأثير سيئ في سعر الأسهم. غير أن معظم الشركات ضخمة إلى درجة بحيث لا يؤثر هذا عليها إلا قليلاً. فشركة باسيفيك غاز آند إلكتريك كان لديها 400 مليون سهم قائم عام 1978. لذا فإن إضافة 10 ملايين سهم جديدد سيعني تخفيف بنسبة 2.5 في المئة لكنه سيدر على الشركة نحو 200 مليون دولار.

الفائدة من مالك الشركة عبر مدد مختلفة تتراوح بين بضعة أشهر و30 إلى 40 سنة. وهكذا فإن شركة توليد الكهرباء التي تبني محطة تعمل بالفحم بكلفة 1 مليار دولار عليها أن تستمر بدفع الفائدة بعد حلول القرن الواحد والعشرين مثل ما عليها دفع أصول الدين عند مرحلة معينة من الزمن[8]. وستكون كلفة المحطة أكبر بكثير فيما إذا كانت نسبة الفائدة 15 في المئة مقارنة بما ستكون عليه إذا كانت نسبة الفائدة 8 في المئة. إن نسبة فائدة بحدود 15 في المئة يعني زيادة تبلغ 71 في المئة من كلفة البناء الكلية – إذا ما غطيت الفائدة والأصول في 30 عام مقارنة بنسبة ربح تبلغ 8 في المئة[9]

لا تعرف الشركة المنتجة للكهرباء عادة نسبة الفائدة التي يجب أن تدفعها إلا لحظة الاستدانة (تحمل معظم ديون شركات الكهرباء نسبة فائدة ثابتة لذا فإن الشركة تعرف النسبة لمجمل مدة القرض). وإذا ما استطاعت استدانة كامل كلفة البناء والمعدات في نفس الوقت فسيكون لديها فكرة جيدة لكلفة لرأس المال الثابتة عبر فترة حياة المنشأة. غير أن استدانة كامل المبلغ مرة واحدة غير ممكن وغير صحيح. وأول شيء يجب أن تعرفه الشركة على وجه الدقة هو الكلفة النهائية للتشييد. وسيكون دفع فائدة على مليار دولار غير ذي معنى أيضاً عندما تكون الحاجة الآنية هي لمئة مليون هذه السنة، في حين سينفق باقي المبلغ عبر خمس سنين. وهذا يعني أن كلفة الفائدة تصبح عرضة للتوقع والشك بصورة متزايدة. فخلال الفترة 1978 لغاية 1983 مثلاً كان من الممكن لشركة توليد كهرباء أن تدفع فائدة تصل إلى 18 في المئة،

---

8 ـ تفضل الديون للمدد الطويلة في معظم الحالات لأن القيمة الحالية المحسومة لأصل الديون تنكمش كلما ابتعد زمن استحقاق الدين. وتستطيع الشركة أن تعرف بالضبط أيضاً كلفة رأس مالها الثابتة إذا ما استطاعت أن تستدين لعمر المنشأة. وتعلم ذورة الكلفة بهذه الطريقة لأنها تستطيع على الغالب إعادة التحويل وخفض الكلف إذا ما قلت نسب الفائدة. ومقدرة الشركة على الاستدانة لكميات كبيرة ولمدة طويلة لأن ذلك يعني أن هناك ثقة في السوق بإمكانيتها على تأدية تسديد الفائدة في المستقبل.

9 ـ يحدد هذا المقدار من قسمة القيمة الحالية على ما يدعى على الغالب عامل استرداد رأس المال ـ (CRF). ويمثل هذا العامل في جوهره الدفعة السنوية المطلوبة R لإطفاء القيمة الحالية (P) عبر n من السنين عند نسبة ربح معينة (i) أو:

$$R = P\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

وبالنسبة لـ P محددة و 30 = n ستحصل على R/P = 11.25 عندما تكون i = 0.08

$\frac{P}{R} = 6.56$. When i = 0.15.

وستكون نسبة النتيجتين 1.71 أي إن هناك زيادة قدرها 71 في المئة في الكلفة الكلية إذا ما كانت نسبة الفائدة 15 في المئة بدل 8 في المئة.

أو ما قد تكون بحدود 9 في المئة فقط عن دينها. ومع أواسط التسعينيات كان بإمكان شركات ذات سمعة مالية جيدة أن تستدين بكلفة 7 في المئة وحسب، رغم أن الفائدة تذبذبت بحدود واحد في المئة أو أكثر قليلاً من عام إلى أخرى. ومن المؤكد أن أي شركة كانت قد خططت لبناء منشأة جديدة عام 1978، كانت أيضاً قد قدرت الفائدة دون الواقع، وكانت الشركات الكبيرة آنذاك تدفع أقل من 9 في المئة فائدة عن ديونها، ولم تكن هذه النسبة خلال القرن كله قد وصلت إلى 18 في المئة في الولايات المتحدة – غير أنها قاربت ذلك المستوى بعد سنين قليلة من ذلك التاريخ. ومن الواضح أن التوقيت مهم جداً، لكن على شركات الكهرباء اتخاذ قرارات تعتمد على إسقاطات غير مؤكدة لكل من الطلب على الكهرباء (أي يقرروا ما إذا كانوا بحاجة إلى محطة توليد جديدة في المستقبل) ونسب الفائدة. ومن الممكن أن تؤدي تقديرات عالية على الطلب إلى أسعار أعلى عندما تصرف الشركات نقوداً على سعة تعتقد أنها بحاجة إليها[10]. غير أن التقديرات المنخفضة للطلب قد تؤدي من ناحية أخرى إلى سعة توليد غير كافية لمواجهة الطلب. أما التقديرات المغلوطة لنسب فائدة فقد تدفع بالأسعار إلى الارتفاع أو الانخفاض وهذه بدورها ستربك التقديرات الأخرى للسعة التي يحتاجه إليها المستهلكون.

وما تجب ملاحظته أيضاً أن كلفة الاستدانة ـ أي نسبة الفائدة ـ تختلف بين شركة وأخرى. ومع الأخذ بنظر الاعتبار أن على شركات تجهيز الكهرباء إدامة منشآت ضخمة، فهي عادة تتحمل أيضاً ديوناً كبيرة. وقد كان على شركة كومونويلث إديسون (Commonwealth Edison) في إلينوي مثلاً دين طويل المدى بلغ 7 مليارات عام 1995. ولا يعتري الممولين أو البنوك قلق عادة حول ديون شركات تجهيز الكهرباء الضخمة التي تظهر في موازناتها السنوية لأنهم يعرفون أن كمية كبيرة من النقد تتدفق إلى الشركة من عملائها. إنما هناك دائماً حدود لما يمكن لشركة أن تستدينه مقابل مدخول معلوم لها. وقد تكون بعض الشركات قريبة جداً من تلك الحدود بحيث إن أي دين جديد لها يحمل معه خطر عدم تسديده. وإذا ما كان على الشركة أن تستدين مبالغ جديدة فعليها أن تقدم بعض الإغراءات للممولين بهيئة نسبة فائدة أكبر ـ وهي مكافأة للمجازفة. وهكذا فقد تدفع إحدى الشركات 8 في المئة من دينها، في حين

10 ـ أدت التوقعات غير الصحيحة في السبعينيات حول الطلب ببعض الشركات إلى بناء منشآت أكثر مما هو مطلوب. والحقيقة أن بعض الشركات كان لديها في أوائل الثمانينيات سعة تزيد على الحاجة بنحو 40 في المئة.

تدفع الثانية 9 أو 10 في المئة ما يعني أن الشركة الثانية ستتكبد كلفة رأس مال ثابتة أعلى، حتى إذا قامت ببناء منشأة جديدة بنفس كلفة الشركة الأولى، وتعمل بنفس الكفاءة. وربما تتكبد الشركة مثل هذه الكلفة الإضافية ببساطة لأنها تمتلك منشأة كهرباء نووية. فالحوادث يمكن أن تكون مكلفة جداً، إذ إن حادثة ثري مايل آيلاند كلفت مالكيها وهم شركة General Public Utilities نحو مليار دولار للتنظيف.

هناك العديد من الكلف التشغيلية والمستمرة لدى كل شركة توليد لكن من الممكن أن توضع تحت واحد من صنفين: كلف الوقود والتشغيل وكلف الصيانة. وربما تكون كلف الوقود أصعبها في التقدير. فمن الذي كان سيقدر في الستينيات أن كلفة الوقود ستزيد بنسبة 1000 في المئة في السبعينيات؟ ثم ستنخفض إلى النصف في الثمانينيات؟ لقد كان هناك في التسعينيات تحول إلى استخدام أكبر للغاز الطبيعي وأحد أسباب ذلك رخص ثمنه. ولا يوجد توقع صريح أو ضمني أن الأسعار المنخفضة ستستمر في المستقبل المنظور، وهو ما قد لا يحدث إذا ما ارتفعت الأسعار نتيجة شُح الغاز الطبيعي.

ربما تكون كلف التشغيل والصيانة أقل الكلف المتغيرة إثارة للجدل رغم إمكانية حدوث خلاف حتى في هذه الكلف. فالكلف المستقبلية لتطبيق التعليمات البيئية في المحطات العاملة بالفحم مثلاً، أو كلف صيانة المحطات النووية التي بدأت تتقادم ستكون بالتأكيد عرضة للشك والجدل.

علينا أخيراً أن نفكر في كفاءة التشغيل للمحطة وهو مقياس يعتمد على عامل السعة (Capacity Factor) (CF). وما نعنيه بهذا هو كمية الكهرباء المنتجة فعلياً خلال العام مقارنة بالكمية التي كانت ستنتج إذا ما عملت المولدات بسعتها الكاملة بصورة مستمرة. وفي الحالة المثالية ستعمل منشأة تجهيز الحمل الأساس بصورة مستمرة لتزويد ذلك المستوى غير القابل للنقصان من الطلب على الكهرباء والذي لا يتوقف (انظر الفصل الثالث). ويجب على أي حال إيقاف كل الماكينات العاملة بصورة دورية لغرض الصيانة. كما ستحدث أيضاً توقفات غير مبرمجة وبصورة عشوائية بسبب الفشل الميكانيكي أو الحوادث. وكلما كان التصميم ونوعية التشغيل جيدين كلما ازدادت نسبة الساعات التي تعمل بها المنشأة خلال السنة، غير أنها بالطبع لن

تقارب 100 في المئة. ومع ذلك فإن المولد الكهربائي الذي يعمل بمعامل سعة أعلى سيقدم لمالكيه دخلاً أكبر من مولد ذي معامل سعة منخفض.

ويجري احتساب معامل السعة للمحطة بقسمة عدد الكيلوواط – ساعة المنتجة فعلاً خلال العام على عدد الكيلوواط الذي صممت المنشأة إنتاجه (بكلمات أخرى سعتها الكلية) مضروباً في عدد ساعات السنة: أي إن:

CF (معامل السعة) = (عدد كيلوواط – ساعة المنتجة في العام فعلياً)/ (السعة التصميمة kW x 8760)

حيث إن ساعات العام تبلغ 8760 ساعة.

ونستطيع باستخدام معامل السعة أن نحسب كلفة وحدة الكهرباء (سنت/ كيلوواط ـ ساعة) المطلوبة للسعة الفعلية (كيلوواط ـ ساعة) المولدة وذلك مطلوب سنوياً لتسديد كلف رأس المال الثابتة. وكلما كان معامل السعة واطئاً كانت كلفة الوحدة أعلى. أو للتعبير عنها بطريقة أخرى، إذا ما كانت المنشأة تعمل بسعة منخفضة فلن تولد دخلاً كافياً لتغطية نفقاتها.

وقد يكون من الأفضل أن نستخدم مقياساً مختلفاً عن معامل السعة في تحديد التشغيل الفعال للمنشأة. ولما كانت الشركة تذكر في تقاريرها معامل السعة كمقياس للاستخدام الفعلي، فقد تكون التقارير مضللة. وعلى سبيل المثال، إذا كان مجهز قدرة قد أعتمد تقديرات للطلب أعلى مما يجب، فسيترتب عليه إبقاء بعض من سعته التوليدية عاطلة، رغم أنها بحالة جيدة وتعمل بصورة كفوءة وكان بالإمكان استغلالها[11]. لذا فالمقياس البديل هو عامل التوفرية (Availability Factor) (AF) الذي يمثل الساعات التي كانت فيها وسيلة التوليد الكهربائية جاهزة للاستخدام إذا ما استدعى الأمر. ويحتسب عامل التوفرية ببساطة بقسمة الساعات التي تتوفر فيها المولدة للتشغيل خلال العام على عدد ساعات السنة.

AF = عدد الساعات الفعلية المتوفرة سنوياً/ 8760 (ساعة في السنة).

11ـ أثّر هذا في مقارنة كلف محطات التوليد النووية مع تلك العاملة بالفحم في نهاية السبعينيات والثمانينات. وغالباً ما شغلت الشركات منشآتها النووية في حين كانت المنشآت العاملة بالفحم متوقفة بسبب السعة الزائدة. غير أن توفرية منشآت الفحم كانت بصورة عامة أعلى من المنشآت النووية.

وعامل التوفرية هو عامل مهم لنوعية اعتمادية المنشأة ويجب أن يكون عاملاً في أي نقاش عن اقتصاديات القدرة الكهربائية. ويجب أن نلاحظ في الوقت ذاته أن عامل السعة هو مقياس يستخدم نموذجياً في حساب كلفة محطات القدرة*.

مقارنة كِلف محطات القدرة

يعرض الجدول رقم 9-1 كلف دورة الحياة لمحطتي قدرة للحمل الأساس إحداهما محطة بخارية موقدة بالفحم والأخرى ذات نظام دورة مدمجة وتعمل بالغاز الطبيعي. (وهذه مجرد أمثلة وليست مقارنات محددة). والكلفة الرأسمالية لمحطة الفحم أعلى بكثير وسبب ذلك جزئياً على الأقل هو الكلفة الرأسمالية لمعدات تخفيف التلوث الكثيف المطلوبة في المحطات العاملة بالفحم. (انظر الفصل السادس). وتمتلك المحطات العاملة بالغاز تميزاً هائلاً عندما يتعلق الأمر بالتلوث. فهي لا تنتج ثاني أكسيدالكبريت كما لا تنتج إلا مقادير ضئيلة فقط من أكاسيد النيتروجين. إضافة إلى ذلك لا تنتج المحطات العاملة بالغاز إلا نصف كمية ثاني أكسيدالكربون وهو الغاز الرئيسي المسبب لتأثير البيت الزجاجي لكل كيلوواط– ساعة مقارنة بمحطة اعتيادية تعمل بالفحم. (انظر: Flavin & Lenssen, 1994). وتصبح الكلفة الرأسمالية لمحطة الدورة المدمجة تقل بنحو 40 في المئة من محطة الحمل الأساس التي تعتمد على الفحم.

هذا وقد افترضت نفس نسب الفائدة ونفس معامل السعة للحالتين وهما 8.5 في المئة و65 في المئة على التوالي. وقد برهن النوعان على تمتعهما بموثوقية عالية وقد يتمكنان من تحقيق سعة تشغيلية تبلغ أكثر من 65 في المئة. ومحطات الفحم التي تحقق عامل توفرية يتجاوز 80 في المئة شيء مشاع كما، إن التوربين الغازي المدمج مع منظومة بخار تقليدية قد حقق موثوقية ممتازة مشابهة[12].

* انظر في هذا الخصوص الهامش السابق ضمن (احتساب كلفة القدرة الكهربائية) حيث جرى التفريق بين التوقفات المبرمجة والتوقفات غير المبرمجة للصيانة الإصلاحية التي تؤثر في موثوقية المعدات.

12 ـ كانت الموثوقية موضع اهتمام كبير جداً في حالة المنشآت النووية مقارنة بتلك العاملة بالفحم. وكان هناك خلاف كبير على موثوقية المحطات العاملة بالفحم. وقد ادعى المروجون للطاقة النووية معامل سعة أعلى بالنسبة إلى المحطات النووية لكن العديد من المحطات النووية كان لها عامل توفرية ضعيف وبدت المحطات النووية على المعدل أقل موثوقية من محطات الفحم (انظر: Komanoff, 1980).

الجدول 9-1: كلفة دورة الحياة للقدرة

	الفحم	محطة الغاز المدمجة
كلفة رأس المال	1400 دولار / كيلوواط	600 دولار / كيلوواط
عامل السعة	65 في المئة	65 في المئة
نسبة الفائدة	8.5 في المئة	8.5 في المئة
رسم رأس المال الثابت	2.6 سنت / كيلوواط –	1.14 سنت/ كيلوواط ساعة
التشغيل والصيانة	0.56 سنت/ كيلوواط ـ ساعة	0.20 سنت/ كيلوواط ساعة
الوقود	0.93 سنت/ كيلوواط ـ ساعة	2.47 سنت/ كيلوواط ساعة
المجموع	4.09 سنت/ كيلوواط ـ ساعة	3.81 سنت/ كيلوواط ساعة

كل الأرقام بدولارات 1994 ثابتة،

مقتبسة من: Booth and Rose, 1995, Industry data.

وما يعنيه افتراض كلف اقتراض متماثلة هو أن الممولين لن يعاقبوا شركة الكهرباء بسبب اختيارها لنوع معين من الأجهزة بدل النوع الآخر. وتعكس رسوم رأس المال الثابتة نتيجة ذلك الفرق في كلف البناء. وكانت الكلف لهذا المثل 2.6 سنت لكل كيلوواط ـ ساعة في حين أن المحطة المدمجة لنظام الغاز تكلف 1.14 سنت لكل كيلوواط ـ ساعة. وهذا بالطبع لمحطة جديدة. وربما تكون المحطات القديمة العاملة بالفحم تعمل برسم رأسمال ثابت أعلى (أو أقل). وما يجب أن يشار إليه هو أن هذا ليس إلا تصوراً. فالتعليمات الجديدة حول البيئة مثلا قد ترفع أو تخفض الرسوم فتغير نسبة الكلف. كما قد تتغير نسبة الفائدة فتتغير الكلف لكليهما. ويجب على شركة توليد كهرباء تخطط لبناء محطة لتجهيز الحمل الأساسي أن تتقبل الكلفة المترتبة على رأس المال عند نسبة الفائدة المتوقعة ليتم إطفاؤها عبر العمر التشغيلي للمنشأة.

ويتوقع أن يحظى الغاز بأفضلية كبيرة في كلف التشغيل والصيانة أيضاً. وفي حين أن إسقاطات كلف التشغيل والصيانة مبنية على خبرة تشغيلية واسعة في حالة الفحم، إلا أن نظام محطات الغاز المدمجة مع ذلك يثير بعض الأسئلة الإضافية على المدى البعيد. فوسائل توليد القدرة المعتمدة على الغاز قد استخدمت بالطبع منذ مدد طويلة لحمولات الذروة والحمولات الوسطى غير أن هذه التكنولوجيا لم يفكر فيها كتكنولوجيا محتملة لقاعدة الحمل إلا مؤخراً وذلك لوجود شعور بأن أي نظام يستخدم الغاز سيتحمل كلف صيانة أعلى من الفحم. ومع ذلك فإن كلف صيانة

محطات الفحم قد ارتفعت عبر الوقت مع وضع قيود بيئية عليها، في حين لم يكن هناك إلا قليلاً من الطلبات على محطات الغاز. نتيجة لذلك هناك درجة عالية من الثقة بأن محطات الدورة المدمجة العاملة بالغاز ستكون في المستقبل أقل المحطات كلفة في صيانتها.

غير أن العامل الأخير وهو الوقود يعتبر أكثرها إشكالاً في هذه المقارنة. فكلفة الوقود للمحطة العاملة بالغاز أكثر بكثير من تلك العاملة بالفحم. إنما هل هذه المقارنات واقعية؟

ليس هناك من شك أن الفحم سيكون أرخص من الغاز إذ إن احتياطي الفحم متوفر مبتذل جداً ومحلي. وفي الوقت نفسه كان الغاز الطبيعي اعتباراً من 1990 رخيصاً نسبياً وبدا أيضاً أن تجهيزاته كانت متوفرة. وعلى أي حال إذا كان المقياس هو كلفة دورة الحياة فمن الصعب القول إن النسبة المعطاة هنا وهي 1: 2.65 ستكون دقيقة مع مرور الزمن. فاحتياطي الغاز المحلي ـ الذي يغطي كما رأينا في الفصل الثاني مصادر الغاز التي يعتبر استخراجها مجدياً بالأسعار الجارية ـ ليست كبيرة بصورة استثنائية. وهناك رواسب أخرى يمكن استخراجها إنما عند أسعار أعلى[13]. وهكذا إذا ما ارتفعت أسعار الغاز نسبياً إلى الفحم فسترتفع كلفة دورة حياة الدورة المدمجة. ويمكن لهذا أن يغير الاستنتاج الشامل. ويبدو من الجدول 9-1 أن كلفة دورة الحياة للكيلوواط ـ ساعة في الدورة المدمجة ستكون 3.8 سنت فيما ستكون كلفة الفحم أعلى من ذلك بقليل. وفي حين أن الكلف ستزداد لكليهما مع التضخم لكن من المتوقع أن تزداد بنفس النسبة[14].

غير أن هذا سيكون صحيحاً فقط إذا ما كانت التقديرات (لكل العوامل وبخاصة كلفة الوقود) صحيحة. واختلاف الكلفة بين النظامين باستخدام هذين النوعين من الوقود صغير نسبياً (نحو 7 في المئة) عندما تضاف كل المكونات. إن موثوقية هذه

---

13 ـ قد يدفع الطلب الأسعار إلى الأعلى. وتنادي صناعة الغاز بتوسيع استخداماته ليشمل أشياء مثل السيارات العاملة بالغاز. ويمكن لهذا الطلب مدمجاً مع الطلب الأكبر للغاز الطبيعي في توليد الكهرباء أن يدفع بالغاز مع مرور الوقت إلى أسعار أعلى بكثير.

14 ـ يحتمل أن يحتفظ الفحم (ويتوقع أن يستمر باحتفاظه) بأفضلية سعرية مقارنة بالغاز وذلك في بعض مناطق القطر وبخاصة حين تكون المحطة الكهربائية مجاورة لمنجم فحم مما يقلل من كلفة نقل الفحم.

يجري في هذه الحالة تجنب كلفة معظم الأعمال المدنية وهي عادة كلفة عالية تشكل نسبة قد تصل إلى 40 في المئة من الكلفة الكلية لمحطة حرارية جديدة، كما قد يُستفاد من بعض الأنظمة المساعدة الموجودة في المنشأ.

التقديرات على أي حال عرضة للشكوك، وما قد يبدو على أنه الخيار المثالي في أواسط التسعينيات ربما يصبح اختياراً سيئاً بعد خمس سنين وحسب. وقد يكون هناك سبب جيد لاختيار الغاز حتى عندما يتوقع المرء أسعاراً أعلى وأفضلية على الفحم. وستكون الأسباب البيئية في المقدمة. فأي تحرك نحو انبعاثات غازات دفيئة أقل ستشجع على استخدام الغاز كحل مؤقت.

وهناك حتى ضمن التقديرات الحالية مجال كافٍ للنقاش. فالكثيرون في صناعة الفحم لا يتقبلون الاستنتاج القائل إن الغاز هو الأرخص. ومثلما قال اثنان من دعاة الفحم إذ كتبا: «... يبرز فحم الغرب واطئ المحتوى الكبريتي كخيار الوقود الأفضل اقتصادياً لعدد متزايد من الشركات» (انظر Anderson & Barlett, 1996).

كان هناك مع ذلك توجه لدى شركات تجهيز الكهرباء في نهاية الثمانينيات لتجنب المشكلة والقيام بدل ذلك بإعادة تجهيز منشآتهم بمعدات أحدث. ويجري بهذه الطريقة تخفيض الكلف الاستثمارية في حين ترتفع القدرة التي تولدها منشأة معينة. فقد جرى على سبيل المثال إعادة تجهيز منشأة قديمة تعمل بالغاز في رود آيلاند بدورة مدمجة زادت القدرة التي تولدها ثلاثة أضعاف (انظر: Moore, 1995). وعادة ما تكون كلفة إعادة التجهيز أقل بكثير مما هي عليه لمحطة جديدة كليا. وقد أرادت إحدى الشركات مثلاً إعادة تجهيز منشأة تعمل بالفحم وبلغت الكلفة 800 دولار/ كيلوواط في حين كانت كلفة منشأة جديدة ستبلغ ضعف ذلك (انظر: Moore, 1995)[15]. وقد أصبحت الدورة المدمجة الخيار المفضل عند إعادة التجهيز، غير أن بعض الشركات وبخاصة حيث يتوفر الفحم بصورة غزيرة اختارت حرق الفحم بطريقة الطبقة المميعة (fluidized bed) وقد اتبع ذلك في حالة إعادة تجهيز في إنديانا أيضاً إذ وقع الاختيار على الغاز التركيبي (syngas) المشتق من الفحم (انظر الملحق ج). ومع منتصف 1995 كان قد جرى إعادة تجهيز ما يزيد على 3000 ميغاواط في الولايات المتحدة ـ وذلك ما يعادل ثلاث محطات مركزية كبيرة على الأقل ـ مع وجود عدد من المشاريع تحت الدراسة.

15 ـ بلغت الكلفة الاستثمارية لمحطة جديدة كبيرة تملكها شركة تكساس ـ نيو مكسيكو وتستخدم الفحم عام 1991 نحو 1782 دولار/ كيلوواط. وقد تكون الكلفة المسقطة لمحطات الفحم الجديدة أقل في بعض الحالات الأخرى لأن الكلفة الاستثمارية تعكس الخيار لمجمل رزمة التكنولوجيا وليس نوع الوقود فقط. وتغير مميزات الموقع أيضاً التي يمكن أن تسهل أو تعقد عملية البناء من الكلفة. ونقطة الأساس هنا هي أن من الممكن إعادة التجهيز بكلفة أقل بكثير من بناء منشأة جديدة.

ومن الممكن تطبيق طريقة الاحتساب المستخدمة هنا لمحطات الفحم والغاز للتكنولوجيات الأخرى أيضاً. ويقارن الفحم والغاز في الجدول رقم 9-2 بمختلف أنواع التكنولوجيا الأخرى من النووية إلى الفولتضوئية. ولا يعتبر كثير من هذه التكنولوجيات مجدياً (على المدى القريب، في الأقل) للحمل الأساس غير أن الجدول يبين كيف يمكن أن تُسعّر أياً من تكنولوجيات توليد القدرة.

الجدول 9-2: كلفة القدرة الكهربائية

النوع	الكلفة /كيلوواط – ساعة(سنت)
الغاز	>4-5c<
الفحم	4-5c
الكهروالمائية	7–4
الجيوحرارية	5-8c
الريح	5-8c
الكتلة الحيوية	6-8c
الشمسية الحرارية	10-12c
النووية	20-4c
الفولتضوئية	30 -20c

بدولارات 1993 الثابتة

مقتبسة من معلومات في: Business Week, Nov 18, 1993; Flavin & Lenssen (1994); Energy for Planet Earth (1991).

لاحظ (في الجدول 9-2) أن الكثير من التكنولوجيات لا تنتج القدرة إلا بكلف عالية للكيلوواط ـ ساعة. وستبحث أسباب ذلك في الفصلين التاليين وفي الملحق ج. غير أن بعض الأسباب تستحق الملاحظة هنا. فالكلف الرأسمالية لمنشآت القوة النووية مثلاً عالية جداً (وغالباً ما تحمل نسب فائدة عالية بسبب المخاطر المالية ومخاطر السلامة التي يعتقد أنها عرضة لها) كما إن معامل السعة فيها منخفضة وهناك شكوك حول كلف التشغيل والصيانة. كما تضيف كلف الإيقاف والتخلص من هذه المحطات نفقات عالية وغير معروفة.

لا توجد من ناحية أخرى كلفة وقود في طاقة الريح أو الطاقة الشمسية غير أن عامل السعة منخفض جداً في حالة الطاقة الشمسية (إذ إنها تعمل فقط في حالة شروق الشمس) في حين أن طاقة الريح مازالت تعاني كلفة استثمارية عالية، كما إن عامل

التوفرية لها مقبول في بعض أنحاء القطر فقط. كما يجب أن نلاحظ أن كلفتها قد تناقصت بسرعة في السنين الأخيرة. وتمتلك تنافسية من حيث الكلفة مع أنواع الوقود التقليدية في بعض أرجاء العالم حيث توجد رياح مستدامة لتعطي عامل توفرية عالية بما فيه الكفاية (انظر الملحق ج).

ولن يجري تبني الخيارات بصورة عامة على مجال واسع ما لم تهبط كلفتها أو أن هناك إعانات تدفع لمستخدمها (انظر الفصل العاشر). وهناك فجوة سعرية كبيرة بين العديد من تكنولوجيات القدرة الكهربائية الجديدة وبين الخيارات الأكثر تقليدية.

إدارة جانب الطلب

كانت مسألة نوع محطة القدرة التي ستبنى ذات أهمية كبيرة في الماضي حيث كان على شركات الكهرباء أن توسع سعتها باستمرار لمواجهة الطلب المتزايد بسرعة. فالاقتصاد النامي يحتاج إلى محطات توليد قدرة أكثر وأكبر. واستمر التفكير على هذا المنوال حتى عقد الثمانينيات. غير أن الولايات المتحدة وكما رأينا في الفصل الرابع بدأت تستخدم طاقة أقل في عقد الثمانينيات لكنها استمرت في النمو اقتصادياً[16]. وبالطبع يتبقى هناك مجال أكبر بكثير للحفاظية حتى مع نمو الاقتصاد. ونستطيع كما مع أشكال أخرى للطاقة أن نستخدم كماً أقل، في حين نحصل منها على ما هو أكثر ونقلص خلال ذلك الحاجة إلى بناء محطات جديدة.

غير أن الحفاظية لها بالطبع كلفة أيضاً. فاستخدام طاقة أقل مع الحصول على منافع أكثر يتطلب من المستهلكين اقتناء معدات أكثر كفاءة وعلى الصناعيين استثمار أموال أكثر في ماكنات أكثر كفاءة وكذلك يحتاج المستخدمون التجاريون إلى أنواع جديدة من المعدات.

كيف تقارن كلفة تلك التحسينات في التكنولوجيا للمستخدمين مع كلفة توليد كهرباء أكثر؟ فهل إن الكلفة المضافة لتحسين أداء جهاز يحتاج إلى كيلوواط ـ ساعة واحدة أقل من الكهرباء المولدة هي أقل أو أكثر من كلفة توليد كيلوواط ـ ساعة واحدة إضافية؟ وقد دعيت الكهرباء المقتصدة نيغاواط (negawatt) والمقارنة هي بين كلفة

16 ـ الحقيقة أن استخدام القوة الكهربائية استمر بالنمو في الثمانينيات لكن بوتيرة أقل بكثير من نموه في العقود الثلاثة السابقة ـ من 7 في المئة سنوياً إلى 2 في المئة فقط.

النيغاواط ـ ساعة والكيلوواط ـ ساعة. ويدعى أسلوب الحفاظية الشامل باسم «إدارة جانب الطلب» أو DSM.

لقد بدأ الجهد في الثمانينيات عندما قام عدد قليل من هيئات الخدمات في بعض الولايات بتشجيع الحفاظية بصورة عامة وبدأت بتغريم شركات الكهرباء التي لا تمتلك برنامجاً لتشجيع الكفاءة، غير أن هذه الجهود وضعت شركات الكهرباء في موقف محرج حيث كانوا مجبرين على تشجيع زبائنهم لكي يقللوا استخدام منتوجهم.

وجاء الدعم الحقيقي لإدارة جانب الطلب عام 1989 حين أوصى الاتحاد القومي لمفوضي تنظيم الخدمات السماح لمنظمي شركات الكهرباء بتبني برنامج فعال لإدارة الطلب وأن تعوَض عن المترتبات. وبعبارة أخرى إذا ما أطلقت شركة كهرباء مثل هذا البرنامج وإدارته وكان هدفها تشجيع الناس على تقليل استخدام الكهرباء فبإمكان الشركة أن تدرج كلفة البرنامج في الأسعار التي يتقاضوها من المستهلكين. أي إنهم سيستحصلون مردوداً عن النيغاواط كما يحصلون على مردود للكيلوواط.

كانت أكثر من نصف الولايات في الولايات المتحدة قد تبنت مع نهاية عام 1993 برنامجاً فعالاً لإدارة الطلب وكان أكثرها أثراً برامج كاليفورنيا والولايات في الشمال الغربي وأيضاً في الشمال الشرقي. في حين كانت شركات الكهرباء تنفق ما يقارب ثلاثة مليار سنوياً على مشاريع إدارة جانب الطلب. وبدأت كندا وبضع دول أوروبية أيضاً الاستثمار في النيغاواط.

تهدف برامج إدارة جانب الطلب إلى تشجيع المستهلكين على تبني تكنولوجيات كفوءة للطاقة. يمكن تحقق ذلك عادة بعرض حسومات للمستهلكين الذين يشترون معدات تتصف بالكفاءة. وقامت شركات الكهرباء على أي حال بتقديم عون مالي لبائعي الأدوات الكهربائية لتخفيض أسعار الأنواع الكفوءة منها كما قدموا عوناً للمشترين ولجأوا إلى تأجير هذه الأدوات (وتؤجر إحدى شركات الكهرباء مصابيح الفلورسنت الحديثة بكلفة 20 سنتاً شهرياً)، حتى إنهم أعطوا بعض الأدوات المقتصدة للكهرباء من دون مقابل. وقد أكدت برامج إدارة الطلب مع التكنولوجيات الجديدة على التسويق والتثقيف بحيث يعرف الناس الخيارات لديهم ويستفيدون من الاقتصاد في الكهرباء.

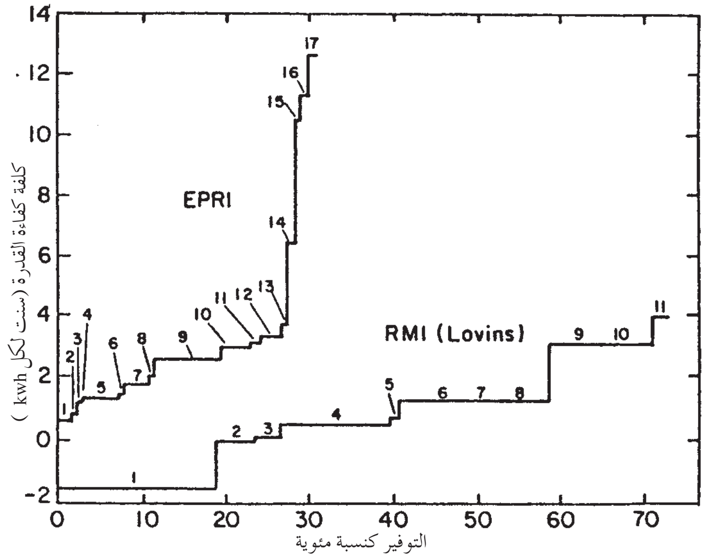
دعنا نرى كيف يطبق ذلك. الحالة المثالية أن يوفر البرنامج نوعاً من الفوائد للجميع. وكانت شركة نياغارا موهوك (Niagara Mohawk) للكهرباء في أعالي ولاية نيويورك قد بدأت برنامجاً لتزويد المستهلكين برأس مرش للاستحمام قليل التدفق وشمعة إنارة فلورسنت صغيرة وعزل حراري لمسخنات وأنابيب الماء لديهم. وتبعاً للإسقاطات، فإن هذه المعدات كانت ستوفر ما معدله 960 كيلوواط ـ ساعة للمستهلك الواحد في السنة. وإذا كانت التسعيرة 7.5 سنت للكيلوواط ـ ساعة فإن الشركة ستخسر 72 دولاراً عن كل مستهلك في العام لكنها ستوفر النقود من حيث حاجتها إلى معدات توليد أقل ويقدر ذلك بنحو 40 دولاراً في العام، غير أن الزبائن يدفعون الفرق إلى الشركة وهو 32 دولاراً يضاف إليها 6 دولارات في العام (لمدة 8 سنين) للمعدات. بهذا ستربح شركة الكهرباء نظرياً، كما سيوفِّر المستهلك 34 دولاراً في العام (انظر: Gellings and Lovins, 1990 Fickett,).

والاعتبار الحاسم من وجهة نظر اقتصاديات القدرة هو إذا ما كانت كلفة دورة الحياة لتجنب التوليد تقل عن كلفة التوليد. وبعبارة أخرى، فإن كلفة برنامج إدارة الطلب يجب أن توضع على نفس الأسس التي تحسب بموجبها كلف التوليد أي سنت/ كيلوواط ـ ساعة، مع مراعاة أننا يجب أن نأخذ بنظر الاعتبار في هذه الحالة السنت المصروف لكي لا نولد الكيلوواط في الساعة. يمكن أن تقاس كلف إدارة الطلب بتحديد أدق باعتبارها كلفة دورة حياة معدات جديدة يضاف إليها كلفة إدارة المشروع متجنبين التعبير عنها بالسنت/ كيلوواط ـ ساعة. ولكي تكون إدارة الطلب أكثر أثراً في الكلفة من معدات القدرة الجديدة (مستخدمين الجدول 9-2) فإن كلفة كل كيلوواط – ساعة يجري إلغاؤه يجب أن لا تزيد على 4 ـ 5 سنت وهي الكلفة التقريبية لتوليد حمل الأساس بالطرق التقليدية. وفي حالة نياغارا موهوك إذا ما سار الواقع حسب الإسقاط فسنستطيع أن نرى بوضوح أن من الأرخص تجنب الكلفة. فإذا ما جمعنا المبلغ الذي يدفع لشركة الكهرباء (ونفترض أنها تغطي كلفة إدارة البرنامج) مع الرسم على رأس المال فإن كلفة نيغاواط – ساعة ستكون 3.9 سنت تقريباً.

إن إمكانات التوفير كبيرة جداً. فمعهد جبال روكي (The Rocky Mountain Institute) وهو مؤسسة مرتبطة بشدة مع الجهود المبذولة لإدارة جانب الطلب قد

حاول أن يبرهن (مثلما في الشكل 9-2) إن 70 في المئة من استهلاك الكهرباء يمكن أن يختزل بكلفة تبلغ 4 سنت أو أقل. وهذا يتعارض إلى حد ما مع دراسة أجراها معهد بحوث القدرة الكهربائية (Electric Power Research Institute) التي حددت النسبة عند حوالى 30 في المئة. ومع ذلك فهذه نسبة هائلة من استهلاك الولايات المتحدة البالغ 900 مليار كيلوواط ـ ساعة سنوياً. إنما هل أمسكنا عملياً بكافة الكلف، كما فعلنا نظرياً؟ لقد كان هذا موضع خلاف. فقد عاينت دراسة أجراها بول جوسكو (Paul Joskow) ودونالد مارون (Donald Marron) عام 1992 لبرامج إدارة جانب الطلب حول القطر، ووجدت أولاً أن الكلف المحتسبة لم تشمل كل كلف الإدارة ومنها مثلاً الكلف الرأسية. الشيء الثاني هو أن الكلف المترتبة على الزبون لم يجرِ قياسها جميعها بصورة مناسبة. وقد وجد الباحثان أن كلفة النيغاواط، حتى إذا لم نأخذ بالحسبان الكثير من هذه الكلف ستتراوح بين 1.9 إلى 6.9 سنت لكل كيلوواط ـ ساعة. وبعبارة أخرى، لم يكن واضحاً ما إذا كان القدر البسيط المطبق من الحفاظية يفي بكلفته.

وقد أقر جوسكو ومارون باحتمالية وجود منحنى للتعلم وبأن كلفة إدارة المشروع ستتناقص مع مرور الزمن. يضاف إلى ذلك احتمالية وجود فوائد اجتماعية أكبر للحفاظية مثل تلوث أقل. وهناك أسباب وجيهة على أي حال تدعو للاعتقاد بأن برامج إدارة الطلب تمثل خياراً قابلا للتطبيق بدل بناء بعض السعة التوليدية الجديدة، وتحتاج إلى وزنها كبديل لتلبية طلب المستهلك لطاقة كهربائية في اقتصاد متنامٍ.



الشكل 9-2: تقديرات التوفير الممكن في الكهرباء بحسب إفادة كاهن (1991)

المصادر: معهد بحوث الطاقة الكهربائية، معهد روكي للبحوث

1– التسخين في المعالجات الصناعية
2– الإنارة البيتية
3– تسخين الماء البيتي
4– تسخين الماء التجاري
5– الإنارة التجارية
6– الطبخ التجاري
7– التبريد التجاري
8–التثليج التجاري
9–المحركات في الصناعة
10–الأدوات البيتية
11–التحليل الكهربائي
12– التدفئة المنزلية
13–التدفئة للقطاع التجاري والصناعي
14–التهوية التجارية
15– تدفئة الماء التجارية (مضخة حرارية أو شمسية)
16–التبريد السكني
17–تسخين الماء السكني (مضخة حرارية أو شمسية)
معهد جبال روكي (RMI)

1–الإنارة
2–تأثير الإنارة في التدفئة والتبريد
3–تسخين الماء
4–قوة التحريك
5–الإلكترونيات
6–التبريد
7– التسخين في المعالجات الصناعية
8–التحليل الكهربائي
9–الحرارة المنبعثة في المراكز السكنية
10– تدفئة المجال
12– تسخين الماء (شمسية)

يبين الشكل نوعين من الإسقاطات لكلفة توفير الكهرباء لمختلف أنواع الاستخدامات والتوفير المتراكم الذي يمكن تحصيله. لاحظ أن المنحنيين يشبهان منحنيات التجهيز فكلما ازداد التأثير السعري أصبح الأخذ بتطبيقات أكثر، أمراً مجدياً من حيث الكلفة وهو ما يزيد الميغاواط الموفر. وإسقاطات المنحنيين مختلفة كما هو واضح. فكلفة استخدام رأس المال لأحسن كفاءة للتخلص من كلفة الكهرباء في تسخين الماء مثلاً تزيد قليلا على سنت واحد لكل كيلوواط ـ ساعة (رقم 4 على المخطط) تبعا لمهعد البحوث، لكنها تقدر بقيمة صفرية من قبل معهد روكي (الرقم 3). ومع ذلك فإن كلا التقديرين في هذا الصنف يعتبر مجدياً من حيث الكلفة. وسيكون الحفاظ المجدي كلفوياً أي نيغاواط ـ ساعة، ذو أربع سنتات أو أقل (لكل كيلواط ـ ساعة). وحتى إن ستة سنتات تعتبر تنافسية تقريباً مع التوليد في بعض المناطق. وقد جمعت التوفيرات في كل صنف لتبين الإمكانية الكلية لتوفير الطاقة. والإمكانية الكلية المجدية من حيث الكلفة تبلغ 30 في المئة تقريباً تبعاً لمعهد البحوث وأكثر من 70 في المئة تبعاً لتحليل معهد روكي. وعلينا أن نلاحظ أن هذه توفيرات ممكنة تستند إلى أفضل تكنولوجيا وأفضل ممارسة، وأنها الحدود العليا لما يعتبر ممكناً وليست بالضرورة ما هو عملي (انظر: Joscow & Marron, 1992).

السوق الكهربائية الجديدة

تبدو إدارة جانب الطلب جذابة من الناحية الاقتصادية والاجتماعية، إلا أن هناك تساؤلاً حول جدواها على المدى البعيد. والسبب هو أن سوق القدرة الكهربائية تخضع لتغيرات غير اعتيادية. وقد ارتؤي أن إدارة الطلب مكوّن للاحتكارات الطبيعية المنظّمة، غير أن إنتاج وتوزيع القدرة الكهربائية صار تنافسياً وبدأت القيود تزال عنه بصورة متزايدة.

إنما كيف يمكن أن يؤثر ذلك في إدارة جانب الطلب؟ يمكن أن يظهر له تأثيران. الأول أن جزءاً من التنافس الجديد في الكهرباء سيكون من دون شك على السعر. فستقوم الشركات بعرض أسعار مغرية للكهرباء لاجتذاب العملاء. وعند هبوط الأسعار، هل ستكون التوفيرات بواسطة النيغاواط جاذبة؟ الشيء الثاني هو أن أسعار الكهرباء الرخيصة قد تعني تحديدات في الخدمة. لذا فإن خدمة مثل إدارة جانب الطلب ستوَفر فقط لأولئك الذين هم مستعدون لدفع تكاليفها.

ما هي هذه السوق الجديدة؟ ولماذا تطورت؟ كانت التغيرات في سوق القدرة الكهربائية قد بدأت في السبعينيات خلال فترة أزمة الطاقة. وكانت حكومة الولايات المتحدة آنذاك تبغي تشجيع كفاءة أعلى في استخدام الطاقة واستخدام موارد الطاقات المتجددة. وكانت إحدى نتائج هذا الجهد قانون سياسة تنظيم شركات المنافع العامة لعام 1978، وطالب هذا القانون شركات توليد الكهرباء بشراء الكهرباء من المجهزين المستقلين. كانت المصادر المتوقفة أكثر من سواها آنذاك هي منشآت «التوليد المزدوج» (cogenetrators) وهي عامة منشآت صناعية تحرق الوقود لتوليد الحرارة – وهذه الحرارة بعد استخدامها الأولي لا تهدر بل تستغل لتوليد البخار ولتدوير المولدات (انظر الملحق ج). وقد جرى تطوير عدد من مشاريع التوليد المزدوج نتيجة لذلك في الواقع. وشملت وسائل التجهيز المستقلة الآخرى منشآت كهرومائية صغيرة أعيد بناءها محل طاحونات وسدود قديمة.

كانت السعة التوليدية للمجهزين المستقلين قد تجاوزت بحلول عام 1992 نحو 55000 ميغاواط في عموم القطر ـ أي ما يعادل نحو 7 في المئة من مجمل الطاقة التوليدية العاملة في الولايات المتحدة. وشجع قانون سياسة الطاقة لعام 1992 التوليد

المستقل بصورة أكبر بما في ذلك استحداث شركات توليد مستقلة تابعة لشركات توليد الكهرباء. وكان مقدار السعة التوليدية الجديدة المضافة إلى الخطوط من قبل المجهزين المستقلين في ذلك الوقت يساوي في الحقيقة السعة الجديدة التي أضافتها شركات توليد الكهرباء ذاتها. واستخدم معظم المجهزين المستقلين وحدات توليد صغيرة لا تزيد سعة الواحدة منها عن 25 ميغاواط. وفي حين ركز هؤلاء في البداية على المصادر الكهرومائية والحرارة الموجودة إلا أنهم بدأوا في التسعينيات بناء منشآت تستخدم توربينات غازية زهيدة الكلفة. وهذه المنشآت ذات وحدات نمطية وقليلة كلفة البناء والإدامة نسبياً (وهي تحتاج إلى ثلث عدد العاملين لتشغيلها مقارنة بمنشأة بخارية). وأصبح سعر هذه التوربينات تنافسياً بصورة متزايدة ومعدة سلفاً للتوليد بكلفة لا تزيد عن 500 دولار لكل كيلوواط (انظر: Bayless, 1994). وعملت هذه الوحدات بصورة أساسية لأحمال الذروة والأحمال الوسطى، وقد برهنت على ربحيتها وجرى إنشاء أعداد متزايدة منها نتيجة لذلك.

لقد دعم نجاح المجهزين الصغار ـ ما كان يبدو واضحاً في الصناعة وهي أن الأكبر ليس بالضرورة الأفضل. ولم يكن بالضرورة الأكثر ربحية. وأضحت الطبيعة الاحتكارية للصناعة موضع تساؤل – كما حاول بعض الاقتصاديين أن يبرهن لسنين (Hammond, 1986; Moorhouse, 1995).

فما الذي تغير في الواقع؟ لقد انبثق التغير إلى حد ما من تكنولوجيا توليد الكهرباء ذاتها. ومع أن الكلفة الرأسمالية وكلفة الوقود للوحدات الأكبر كانت تميل إلى الوقوع مع الوحدات الأكبر لكن لوحظ أن موثوقية المنشآت البخارية الكبيرة كانت تدفع الثمن. وكانت التوقفات غير المبرمجة للوحدات البخارية التي تزيد سعتها على 600 ميغاواط، كما لاحظ أحد الكتاب تبلغ في أوائل السبعينيات ضعف التوقفات غير المبرمجة في الوحدات ذات السعة التي تقل عن 600 ميغاواط: (Berlin, Cicchetti and Gillen, 1974). كما لاحظ معهد بحوث الطاقة الكهربائية أن الترك في محطات كبيرة إلى توربينات غاز صغيرة يمكن توضيحه في حقيقة أن الاقتصاد المركزي مع الميزان تجاوز «اقتصاديات الدقّة الموزعة». غير أن السوق كانت قد تبدلت بسبب التقدم في أنواع تكنولوجية أخرى. فقد أصبح من الأيسر بواسطة الحواسيب والاتصالات مراقبة وتقديم التقارير عن التعاملات بين المجهزين والزبائن. لذا يمكن لمجهز طاقة أن

يراقب زبائنه عبر منطقة جغرافية واسعة حتى عندما يكونوا متداخلين مع زبائن تجهزهم شركة أخرى.

في حين كان تطور مجهزي القدرة المستقلين يتزايد على أي حال، فتحت الهيئة الاتحادية لتنظيم الطاقة في نيسان/ أبريل 1996 السوق لمنافسة أوسع. فقد طالب هذا القرار أن يسمح نظام نقل القدرة الكهربائية بمجمله لأي منتج ميسراً بذلك لأي شركة كهرباء في أي جزء من القطر شراء القدرة من أي مجهز ـ أكان شركة كهرباء أم من المجهزين الجدد. ورغم أن القرار كان يطبق على بائعي ومشتري الجملة إلا أن المتوقع أن يدفع بالأسعار إلى الانخفاض عندما تبدأ شركات الكهرباء البحث عن القدرة من مناطق بإمكانها إنتاجها بكلفة أقل. والاختلافات المناطقية تلفت النظر، فقد كانت شركات الكهرباء في شمال شرق الولايات المتحدة مثلاً تستوفي من زبائنها رسماً للمفرد يبلغ ضعف السعر الذي يدفعه المستهلك في الجنوب. وتعكس مثل هذه الاختلافات كلفاً تغرى في الغالب إلى سهولة الوصول إلى الموارد أو إلى القيود البيئية المحلية.

غير أن قرار الهيئة الاتحادية لتنظيم الطاقة لم يكن إلا خطوة أخرى لما يُعتقد أنه سيكون انفتاحاً كاملاً للسوق، ونهاية لنظام الخدمات الاحتكاري. والحقيقة أن بضع ولايات وأكثرها لفتاً للانتباه كاليفورنيا قد خططت بالتزامن مع قرار الهيئة الاتحادية لاتخاذ الخطوة الأخيرة لجعل سوق الكهرباء تنافسية من خلال السماح لزبائن المفرد ـ بمن فيهم المستهلك العادي ـ أن يشتروا مباشرة من أي مصدر للقدرة يختارونه[17]. وبعبارة أخرى، فالمستهلك في سان فرانسيسكو سيكون قادراً على شراء القدرة من مولدها في سان دييغو – أكان شركة كهرباء أو شركة توليد خاصة وسيكون إيصال القدرة عليه مؤمناً. وستتيح وسائل الاتصال بعيدة المدى والمعدات الحاسوبية الحديثة للشركات أينما كانت التفاعل بسرعة مع أي من زبائنها.

والنظام التنافسي المسمى بـ «المداورة» (Wheeling) للبيع بالتجزئة إذا طبق بصورة كاملة سيغير من طبيعة صناعة الكهرباء جذرياً، وسينصب شيء من هذا بالمنافسة على السعر، وسيتمكن المنتجون بكلف منخفضة أن يبيعوا بأسعار أقل من

17 ـ ستطبق أنظمة كاليفورنيا للسوق غير المقيدة بصورة كاملة في عام 2002 (Douglas, 1994).

منشآت التوليد عالية الكلفة. غير أن هناك أبعاداً أخرى يمكن أن تبنى المنافسة عليها. فبعض المجهزين مثلاً قد يعرضون ما هو أكثر في خدمة الزبون مثل الصيانة والإصلاح والضمان والتخطيط. ويمكن لبرامج إدارة الطلب أن توفر أفضلية تنافسية للبعض غير أن الزبائن سيدفعون مباشرة لبرامج التقليل من الكلفة التي تلائم متطلباتهم الفردية. إن ميزة السوق إذا ما أصبحت تنافسية ستتطلب ما هو أكثر من الإعلان والتسويق والدعم التقني وما إلى ذلك. أما إذا ما طورت بصورة فعالة فستحافظ على الأسعار منخفضة في حين توفر خدمات أفضل وتنويعاً أوسع (Douglas, 1994).

رغم الفوائد البينة لسوق المفرد التنافسية، كان بعض الخبراء حذرون على الأقل حول مداورة الطلب للبيع بالمفرد. فإحدى المشاكل تتمثل في أن المنتجين عالي الكلفة مثل المؤسسات التي بنت محطات نووية كبيرة ستخسر معظم زبائنا وتتركهم مع محطات لم تفي كلفتها العالية ما يهدد قدرة الشركة على الإيفاء بديونها. إن مثل هذه «الاستثمارات الجانحة» لا يقتصر ضررها على شركات الكهرباء فقط بل قد تترك بعض المستهلكين بأسعار تجزئة عالية جداً عندما يصل مجهزو القدرة الرخيصة إلى كامل قدرتهم.

هناك أيضاً مخاوف بالنسبة إلى موثوقية نظام تجهيز الكهرباء. فالمجهزون المستقلون «منخفضو الكلفة» قد لا يمتلكون الوسائل المطلوبة أو المال أو الالتزام لإدامة الخدمة. وتتساءل دراسة أعدها معهد أديسون للكهرباء[18] عما إذا كانت المعدات الحاسوبية المعقدة ومعدات الاتصالات بعيدة المدى التي تجعل التنافس ممكناً ذات موثوقية، وتحاول أن تقنعنا بأن مثل هذا النظام سيحتاج إلى حواسيب أكثر تقدماً وبرامجيات تفوق ما كان متوفراً في أواسط التسعينيات. إضافة إلى ذلك، فإن عطب هذه الأنظمة الإلكترونية يمكن أن ينجم عنه انقطاعات للكهرباء على مجال واسع. وأخيراً قد يحدث فشل لبعض الشركات بسبب المنافسة، فما الذي سيحدث للمستهلك إذا لم يستطع منتج القدرة المرتبط به توليد القدرة؟ ولن يكون في اختيار مجهز «منخفض الكلفة» عندئذٍ أي منفعة إذا لم يكن باستطاعته التجهيز. وما الذي سيحدث للزبون في تلك الحالة؟ ومن الذي سيجهز الخدمة؟ وماذا ستكون كلفة ذلك للبائع والمشتري؟

18 ـ بالنسبة إلى المدى الكامل للانتقادات ضد السوق التنافسية، انظر: «The Case against Retail Wheeling,» Transmission Issues Monograph, no. 5, Edison Electric Institute, July 1992.

لا شك أن هذه المسائل ستبقى قيد النقاش في السنين القادمة رغم احتمالية استمرار إزالة بعض القيود في السوق. ومن الواضح أن إزالة القيود على ما كان سابقاً نموذجاً آخر للاحتكار الطبيعي ألا وهو نظام الاتصالات الهاتفية في الولايات المتحدة، أدى إلى أسعار أقل وخيارات أكثر وإلى تقدم تكنولوجي. ومع ذلك، فقد كانت هناك بعض الإشكالات مع النظام الهاتفي المزالة قيوده. ومن المحتمل تواجد مثل هذه القيود إذا ما أكملت عملية إزالة القيود عن القدرة الكهربائية. وربما لن تكون إزالة القيود الترياق الشافي الذي يعتقده مؤيدوها إنما لن تكون السبب أيضاً في الفوضى التي يخشاها المنتقصون من قدرها. ويتوقع أن يكون سوق القدرة الكهربائية التنافسي بصورة متزايدة واحداً من حقائق الحياة في القرن الحادي والعشرين.

المراجع

Anderson, J. Q. and J. C. Bartlett.. «The Economics and Politics of Western Coal.» *Public Utilities Fortnightly*: 1 April 1996. pp. 35-39.

Bayless, C. E. «Less is More: Why Gas Turbines Will Transform Electric Utilities.» *Public Utilities Fortnightly*: 1 December 1994. pp. 21-25.

Berlin, E., C. J. Cicchetti and W. J. Gillen. *Perspective on Power*. Cambridge, MA: Ballinger Press, 1974.

Booth, W. C. and J. L. Rose. «Using Hourly System Lambda to Gauge Bulk-power Prices.» *Public Utilities Fortnightly*: 1 May 1995. pp. 31-36.

Douglas, J. «Buying and Selling Power in the Age of Competition.» *EPRI Journal:* June 1994. pp. 6-13.

Fickett, A. P., C. W. Gellings and A. B. Lovins. «Efficient Use of Electricity.» in: *Energy for Planet Earth*. New York: W. H. Freeman and Company, 1990.

Flavin, C. and N. Lenssen. «Powering the Future: Blueprint for a Sustainable Electricity Industry.» Worldwatch Paper 19, June 1994.

Hammond, C. H. «An Overview of Electricity Regulations.» in: J. C. Moorhouse (ed.). *Electric Power: Deregulation and the Public Interest*. pp. 31-61. Pacific Research Institute for Public Policy, San Francisco, 1986.

Joskow, P. L. and D. B. Marron. 1991. «What Does a Negawatt Really Cost? Evidence from Utility Conservation Programs.» *The Energy Journal*: vol. 13, no. 4, pp. 41-74.

Kahn, A. E. «An Economically Rational Approach to Least Cost Planning.» *Electricity Journal*: vol. 4, no.5, 1991. p. 269.

Komanoff, C. *Power Propaganda: A Critique of the Atomic Industrial Forum's Nuclear and Coal Power Cost Data for 1978*. Washington, DC: Environmental Action Foundation, 1980.

Moore, T. «Repowering as a Competitive Strategy.» *EPRI Journal*: September-October 1995. pp. 6-13.

Moorhouse, J. C. «Competitive Markets for Electricity Generation.» *The Cato Journal*: vol. 14, no. 3, 1995. pp. 421-442.

القسم الثالث
تكنولوجيا الطاقة في المستقبل

الفصل العاشر
التكنولوجيات البديلة

مقدمة

سنحتاج في المستقبل إلى تكنولوجيات بديلة للحلول محل مصادر الطاقة التقليدية.

قليلٌ من سيعارض هذه المقولة. والحقيقة أن معظم الناس سيقولون إن التكنولوجيات البديلة مرغوبة حالياً. فإذا ما تمكنا من تطوير مصادر للطاقة لا تنضب فسينسينا ذلك همومنا حول حدود الوقود الأحفوري (انظر الفصل الثاني). وحتى إذا ما وجدنا مصدراً جديداً لا يتضمن الاحتراق فستتضاءل همومنا حول ثاني أكسيدالكربون ـ وأثر الاحترار الكوني ـ (الفصل السادس). وإذا ما طورنا بديلاً جديداً للانشطار النووي، فسنتمكن من ترك اختلاف وجهات النظر حول هذه التقنية وراءنا.

ومع أن الناس يتفقون عموماً على فائدة البدائل والرغبة في وجودها، لكن ربما تكون لهم وجهات نظر مختلفة عن المدى الذي يجب أن تصرف بموجبه الموارد المجتمعية الآن في تطوير مثل هذه التكنولوجيات. فدعاة التكنولوجيات البديلة يعبرون عن شكوك قليلة. وعادة يمثلون البدائل على أنها ممكنة تقنياً وقابلة للتطبيق اقتصادياً وسليمة بيئياً ـ إن لم يكن الآن ففي المستقبل القريب. وغالباً ما يُقدم مثل هذا الترويج من المبتكرين أنفسهم وهو ليس بالضرورة تشويه متعمد، بل إنه يعكس آمالهم وطموحاتهم حول مشاريعهم. وما قد يحرك دعاة البدائل هو اعتقادهم بوجود حلٍ تكنولوجيٍ لكل مشكلة تحدق بالمجتمع (Bury,1932).

وتطوير أي تكنولوجيا جديدة (أو أي تكنولوجيا)، كما سنرى في هذا الفصل، هي

عملية غير مؤكدة. فقد لا تقتصر الشكوك على مجرد قابلية المفهوم على التطبيق، بدأ بكونه فكرة لغاية تطويعه لخدمة المجتمع، بل ستشمل أيضاً إمكانية تبنيه بصورة واسعة من قِبَل ذلك المجتمع. وسنرى في الحقيقة أن المقياس الزمني للتبني المتوقع للتكنولوجيا الناشئة اعتبار ذو أهمية في الحكم على فرصها في النجاح، فكلما كانت الفترة أطول زادت الشكوك حول نجاحها النهائي.

ويجب أن نلاحظ أخيراً أن التكنولوجيات البديلة غالباً ما تعِد بتقدم كبير، وبالتحرر من الاعتماد على مصادر غير معتمد عليها للطاقة، وبتقليل الآثار الضارة للتكنولجيات الحالية، والقضاء على مخاطر الحوادث. ويجب التعامل مع هذه الادعاءات يقدر من الريبة. فيجب عدم اقتصار الأمر على قيام التكنولوجيا بإداء عملها بل يجب أن نتساءل: كم هو ثمن ذلك ـ من الناحيتين المالية والبيئية؟ فربما يكون ثمن تطوير وتبني تكنولوجيا بديلة كبيراً إلى درجة تصيب رفاه المجتمع كله بالضرر. وقد تكون الكلفة البيئية لها أقل مما هي للتكنولوجيات التقليدية، لكن ذلك لا يعني أن البديل حميد بيئياً.

نشوء التكنولوجيات الجديدة

المراحل

إن تطوير تكنولوجيا جديدة من مراحل تصورها الأولى إلى تبنيها بصورة واسعة هي عملية تكنولوجية واجتماعية. وهناك العديد من الأمثلة التاريخية على تطور التكنولوجيات (يمكن البحث عن أمثلة في تحليل التكنولوجيا والعمليات الاجتماعية؛ (Kranzberg & Pursell, 1967 and Girifalco, 1991) وقد تطورت هذه التكنولوجيات خلال معظم أجزائها في مراحل ـ ابتداء بالاختراع وحتى مرحلة التبني ـ دون أي إعانات للتطوير مصدرها الحكومة أو الشركات الكبرى. وكان السوق هو الذي يقرر التطوير أساسياً. وهكذا بدأ صنّاع الصلب مثلاً في القرن التاسع عشر يتخلصون تدريجياً من طريقة بيسمر (Bessemer Process) مفضلين طريقة المجمرة المفتوحة (Open - Hearth) لصنع الصلب لأنها تصبّ في مصلحتهم اقتصادياً. كانت الطريقة الجديدة أفضل وأعطت المستخدمين والمنتجين أفضلية مقارنة بأولئك الذين استمروا في اعتمادهم على طريقة بيسمر لصنع الصلب. وقد أعطانا ذات النوع من

التطور الذي يحركه السوق ـ وهو ما يدعى أحياناً النمط الطبيعي للتطور ـ العديد من التكنولوجيات المعهودة بما فيها عديد من تكنولوجيات الطاقة. فالتوليد الكهربائي باستخدام الوقود الأحفوري والتسخين أثناء المعالجة الصناعية مثالين لتكنولوجيات الطاقة التي اتبعت النمط الطبيعي.

وعادة ما يتقدم النمط الطبيعي عموماً بالطريقة الآتية:

1 ـ معرفة جديدة ـ ترسيخ الأسس العلمية الأساسية.

2 ـ التطوير والإمكانية العلمية ـ برهان المبدأ لغرض التطبيق التكنولوجي.

3 ـ بناء النموذج الريادي ـ وهو أول نموذج عامل مصمم للأداء العملي.

4 ـ التقديم التجاري ـ تصميم وتصنيع بكلفة منخفضة للتسويق على نطاق واسع.

5 ـ التبني بصورة واسعة ـ استخدام واسع من قبل المجتمع.

ورغم أن كثيراً من تكنولوجيات الطاقة اتبعت النمط الطبيعي إلا أن هناك عدداً منها لم تتبعه إذ إنها تطورت تحت رعاية حكومية مبرمجة. والنموذج الأبرز بين هذه هي الطاقة الذرية. فقد حصلت الأخيرة على مساعدة حكومية خلال عملية تطورها التجاري، وربما لم تكن لتتطور مطلقاً من غير مساعدة حكومية (Camilleri, 1984). وقد تحتاج بعض تكنولوجيات الطاقة البديلة إلى دعم حكومي كبير أيضاً. فالكلفة والمجازفة التي يتضمنها تطويرها قد تكون أكبر من أن يتعهدها مخترع أو ملتزم تجاري لوحده.

وفي حين أن التطوير التكنولوجي الذي ترعاه الحكومة قد لا يكون محرَكاً من قبل السوق إلا أنه رغم ذلك يوازي في حركته عملية الابتكار الطبيعي. وتتمثل مراحل البرامج التي ترعاها الحكومة بالآتي:

1 ـ البحث ـ البرهان على المبدأ العلمي للإمكانية التقنية.

2 ـ التطوير ـ التصميم الهندسي للإمكانية التكنولوجية.

3 ـ العرض ـ البرهان على الإمكانية التشغيلية والتنافسية الاقتصادية للتكنولوجيا.

4 ـ نقل المشروع إلى القطاع التجاري ـ ويشمل هذا نشر المعلومات وبناء الخبرة

وتجاوز الحواجز إلى التبني الواسع للتكنولوجيا وهي مرحلة غالباً ما تؤدي في اقتصادنا إلى خصخصة عملية الإنتاج.

ويدعى هذا النوع من التطوير الممنهج باسم البحث والتطوير والعرض RD&D (Research, Development and Demonstration). أما نقل المشروع إلى القطاع التجاري فهو كخطوة ممنهجة أمر جديد نسبياً، وقد أُعطي توكيدات مختلفة من إدارات رئاسية مختلفة. ولهذه الأسباب لم تدرج هذه المرحلة الأخيرة في مفردات برامج التطوير الحكومية.

المقاييس الزمنية

تتوفَّر الآن كثير من تكنولوجيات الطاقة البديلة التي تخضع للتطوير ـ وهي موزعة على كل مراحل التطور الطبيعي والممنهج. وكل تكنولوجيا تبعاً لذلك لها مقياس زمني مختلف لتبنيها. وعادة ما تجمّع هذه المقاييس الزمنية ضمن الأصناف الآتية:

قريبة المدى ـ وهي أساساً في المرحلة التجارية غير أنها لم تستغل بصورة جيدة (يتوقع أثرها خلال 5 إلى 10 سنوات).

متوسطة المدى ـ وهي في مرحلة التطوير الهندسي والبرهان على الإمكانية التكنولوجية وإنجاز النموذج الريادي وما زالت تنتظر توكيد حيويتها من الناحية التجارية (10 إلى 15 عام قبل توقع أثرها).

بعيدة المدى ـ وهي مازالت في مرحلة البحث وبانتظار البرهان على إمكانيتها علمياً وما زالت إمكانية تطبيقها تقنياً أو تنافسيتها اقتصادياً بانتظار ما تتمخض عنه هذه المرحلة (15 إلى 25 عام قبل توقع أثرها).

وتعطي توقع أدناه أمثلة من كل نوع. ويحمل كل صنف ضمن المقياس الزمني مترتبات مختلفة من المشكوكية. فالتكنولوجيات المتوقعة ضمن المدى القريب مثلاً هي الأكثر توكيداً في تقدمها إلى الاستخدام الواسع في حين أن النتيجة لتلك التي في المدى المتوسط أقل توكيداً بدرجة ملحوظة.

المدى القريب

الحفاظية الصناعية والكفاءة التقنية (Industrial Conservation and Technical Efficiency) - تقليل فقدان الحرارة وتدوير المواد وكفاءة الاحتراق واستعادة الحرارة والتوليد المزدوج.

الشمسية الحرارية (Solar Thermal) - تسخين الماء المنزلي.

التحويل الشمسي - المباشر (نطاق صغير) (Solar-Direct Conversion (Small Scale)) - الاستخدام البعيد للتحويل الفولتائي الضوئي للمناطق الريفية وفي البرية وللأحمال الكهربائية الصغيرة.

توليد الطاقة من الريح على مقاييس صغيرة وفي مواقع بعيدة (Small-Scale, Remote ، Site Wind Generation) - للمواقع الريفية والبرية وللأحمال الكهربائية الصغيرة.

مزارع الرياح (Wind Farms) - في المناطق التي تتمتع بهبوب رياح منتظم وتستطيع تغذية كميات جيدة من الكهرباء في شبكة المنطقة.

توليد الطاقة الجيو – حرارية - (Geothermal Power Generation) في مواقع محددة حسب توفرها.

توليد الطاقة في مشاريع التوليد الكهرومائية الصغيرة (Small Hydroelectric Generation).

استخراج النفط المعزز (Enhanced Oil Recovery)– ويعمل على إطالة مدى المصادر القابلة للاستخراج.

احتراق الطبقة المميعة (Fluidized Bed) – احتراق الفحم بطريقة أنظف وأكثر كفاءة.

استرداد الموارد (Resource Recovery)– أي استرداد الحرارة من النفايات البلدية.

المدى المتوسط

الوقود الحيوي (Biofuel) – المشتق من الفحم والمشتق من الكتلة الحيوية.

الوقود الأحفوري البديل (Alternative Fossil Fuel) – الرمال القيرية وزيت (نفط) السجيل والغاز الطبيعي غير التقليدي.

التدفئة والتبريد بالطاقة الشمسية (Solar Heating and Cooling)– تكييف فضاء البنايات السكنية والتجارية.

استخدام الطاقة الشمسية للتسخين في المعالجة الصناعية (Solar Industrial Process Heat) – لدرجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة في صناعات المعالجة.

التحويل المباشر للطاقة الشمسية (نطاق متوسط) (Solar Direct Conversion (Medium-Scale)) – الاستخدام السكني والتجاري للتحول الفولتائي الضوئي للأحمال الكهربائية المعتدلة.

توليد الكهرباء من مصادر متجددة (Renewable Generation) ـ توليد الكهرباء على نطاق واسع من الريح أو الطاقة الشمسية وتغذية الشبكة الكهربائية.

استرداد الموارد (Resource Recovery) ـ تخفيض النفايات الصلبة إلى وقود تركيبي.

الخزن المتقدمة (Advanced Storage)ـ بطاريات متقدمة وخزن الهيدروجين والخزن الحراري.

التحويل البديل (Alternative Conversion) ـ خلايا الوقود وديناميكيات الموائع المغناطيسية.

المفاعلات المستولدة (Breeder Reactors) ـ انشطارية تستخدم دورة اليورانيوم.

نقل الكهرباء بمواد الموصلة الفائقة (Superconducting Transmission) نقل الكهرباء بطرق أكثر كفاءة.

المدى البعيد

الاندماج النووي (Nuclear Fusion) ـ مفاعلات القدرة

الطاقة الشمسية (نطاق واسع) (Solar Large Scale) – منشآت كبيرة المقياس واستخدام واسع وتحويل مباشر منخفض الكلفة.

المفاعلات المستولِدة –(Breeder Reactors) وهي مفاعلات انشطارية تستخدم دورة الثوريوم.

اقتصاد الهيدروجين (Hydrogen Economy) ـ نقل وتوزيع الطاقة على مجال واسع باستخدام الهيدروجين كوسيط (أداة).

التوليد عالمياً في مواقع منتشرة(Universal Dispersed Site Generation) ـ استخدام واسع النطاق للتوليد على مقياس صغير و/ أو التوليد من مصادر قابلة للتجديد للاستخدام المستقل أو للربط مع الشبكة الكهربائية المستخدمة.

إن أي تكنولوجيا تصل المرحلة التجارية تكون قد انتقلت من مرحلة إلى مرحلة فتذهب من توقعات مرحلة المدى البعيد إلى المدى المتوسط ثم إلى المدى القريب نتيجة اختراقات علمية أو هندسية أو نتيجة تغيرات في حالة السوق. وقد رأينا في نهاية الثمانينيات مثالاً للاختراق الذي أدى إلى تغير في المقياس الزمني لتطور التكنولوجيا، فقد كانت مواد الموصلة الفائقة التي لا تبدي أي مقاومة كهربائية (للتيارات المستمرة) معروفة منذ عقود. ورغم حقيقة أن الموصلة الفائقة تعني من بين نواح أخرى للتقدم إنتاجاً ونقلاً محسناً للطاقة (انظر الملحق ج) إلا أن إمكانياتها التكنولوجية كانت غير موجودة فعلياً وذلك لأن مواد الموصلة الفائقة المعروفة سابقاً كانت تعمل في درجات حرارة منخفضة جداً بحيث إن كلفة رأس المال والكلف التشغيلية كانت تمنع استخدامها تجارياً. غير أن الباحثين في الولايات المتحدة وسويسرا عثروا على مركبات برهنت على تمتعها بخاصية الموصلة الفائقة في درجات حرارية أعلى من سابقاتها بصورة مثيرة. وفجأة، بدأ التفكير في عديد من الاستخدامات العملية، [وبدأت عمليات التطوير الهندسي لهذه الاستخدامات]. وهكذا نستطيع القول إن المواد ذات الموصلة الفائقة تحركت من المدى البعيد إلى المدى المتوسط على المقياس الزمني للتبني المتوقع.

وتبين قضية الموصلة الفائقة طريقة تبدل التكفّل بالتطوير. فعندما كانت الموصلية الفائقة ضمن المدى البعيد حصرياً أبعدت البحوث الخاصة بها إلى المختبرات تحت رعاية الحكومة أو في حالات قليلة فقط برعاية الشركات الكبيرة. وما إن حصل الاختراق حتى استثمر المال المغامر من قبل المجازفين من رجال الأعمال في شركات تطوير المنتوجات. وبقي العمل الرئيس في المختبر إنما تحسنت فرصه وقامت كل من الحكومة والشركات الكبرى بزيادة تخصيصات البحوث في هذا المجال. وغالباً ما تحتاج حتى التكنولوجيات في المدى المتوسط للتطوير إلى إشراف ممنهج لكي

تنجح وذلك بسبب درجة المشكوكية العالية نسبياً التي تحيط بها. وتحتاج كل الجهود على المدى البعيد إلى الإشراف وعادة ما يكون ذلك من الحكومة[1] وذلك لأن المشكوكية العالية للمردود تجعل المجازفة أعلى مما يستطيع المستمثرون تحمله. غير أن التكنولوجيا عندما تقترب من مرحلة التحول إلى منتوج تجاري ناجح فربما ستجتذب اهتماما أكبر (كما كانت الحالة مع مواد الموصلة الفائقة) من مستثمري القطاع الخاص أيضاً.

تكنولوجيا المدى القريب

تكتسب تكنولوجيات المدى القريب هذه التسمية عندما تكون قد بلغت مرحلة التحول إلى القطاع التجاري. وتكون حينذاك قد برهنت على صلاحيتها تكنولوجياً وقد اشتغلت وحداتها الإثباتية (أو الريادية) بنجاح، كما إن كلفها مقاربة على الأقل للتكنولوجيات التقليدية. ومع ذلك فإن هذه التكنولوجيات لم تتغلغل إلى السوق المناسبة لإمكانياتها الكاملة. وسنتحرى هنا بعض الأسباب لافتقاد هذا التغلغل.

حاجز كلفة التبني

تعتمد حيوية أي تكنولوجيا جديدة أولاً على فعاليتها من حيث الكلفة (Cost Effectiveness). ويجب أن تكون مقاربة أو متفوقة على المصدر التقليدي الذي ستحل محله قبل أن تحصل على استخدام واسع في السوق. ورغم أن تكنولوجيات المدى القريب تكون قد قاربت التنافسية من حيث الكلفة إلا أنها لا تكون أقل من ذلك إلا بقليل فقط. وبتعبير آخر فربما يجب أن يكون هناك بعض التغير في سوق الطاقة أو بعض التغير الذي يقلل الكلفة في التكنولوجيا نفسها ليجعلها تنافسية. وهكذا مثلاً فإن زيادة سعر النفط قد يجعل تكنولوجيا الاستخراج المعزز للنفط قادرة على الحياة اقتصادياً. وقد تتدخل الحكومة كبديل لذلك وتقدم حافزاً يجعل أحد البدائل مجزياً من حيث الكلفة. وقد حاول البعض أن يبرهن على أن المحفزات ستجعل تسخين الماء في المنازل بواسطة الشمس تنافسياً (انظر الفصل الحادي عشر لبحث تقني عن الموضوع) مع الطرق التقليدية لتسخين الماء.

1 ـ ينفذ كمٌّ كبير من البحوث حول الطاقة لصالح الحكومة الاتحادية في مجموعة من المختبرات الوطنية الموجودة في آرغون في إلينوي وفي بروكهافن في نيويورك ولوس ألاموس في نيومكسيكو وفي أوك رج في تينيسي وسانديا في نيومكسيكو.

يمكن من ناحية أخرى أن يكون الوضع الاقتصادي العام عائقاً للاستثمار في البدائل، فقد كان هناك نسب فائدة وانكماش كبيران في بداية الثمانينيات، وكلا العاملين أثبط أي استثمارات رأسمالية مهمة وخاصة من قبل العالم التجاري. وهكذا في حين كانت مستردات الحرارة (Heat Recuperators) والمراجل كفوءة الاستخدام للوقود ووحدات التوليد المزدوج متوفرة، وفي بعض الأحيان على الأقل مجدية من حيث الكلفة، إلا أن تبنيها كان يتقدم بسرعة بطيئة مقارنة بما كان يمكن أن تكون عليه في فترة نمو اقتصادي ونسب فائدة أقل.

وأخيراً قد تكون هناك مشكلة للمستهلكين سببها ببساطة هو تقييم الكلفة التقريبية للتكنولوجيات. وكما بحثنا في الفصل الرابع فإن كلفة البديل (أو المحافظة) قد تكون كلفة رأسمالية إضافية في حين أن التوفير ربما يكون ضمن عوامل السعر، وبخاصة الوقود. وربما يكون من الصعب إقناع فرد، على أي حال على صرف كم كبير من النقد الآن لتوفير زيادات صغيرة عبر الزمن، وبخاصة عندما لا يكون التوفير ظاهراً بصورة تامة بسبب عدم وضوح أسعار العوامل في المستقبل. وقد نتوقع مثلاً أن تبلغ كلفة النفط في مشروع على المعدل 20 دولاراً للبرميل على امتداد العقد القادم ثم نقوم باحتساب كميات النفط (وكذلك كلفتها) التي سيوفرها مسخن ماء يعمل بالطاقة الشمسية. ويعتمد التوفير على سعر النفط وهذه الأسعار غير مستقرة وبصورة متزايدة كلما أمعنا تحليلاً في المستقبل. وربما يتطلب الأمر بضع سنين لكي تستعاد كلفة الاستثمار في بديل آخر ـ أي لكي يستعيد المشتري كلفة رأس المال الإضافي بهيئة كلفة وقود، غير أن المستهلكين سيكونون حذرين إذا ما كانت هناك مدد طويلة لاستعادة استثمارهم.

عملية التبني الاجتماعية

لا يعتبر تأثير الكلفة السبب الوحيد الذي جعل بعض البدائل في المدى القريب يفشل في انتشار تبنّيه بصورة واسعة. ويمكن أن يكون التبني بطيئاً حتى مع الحوافز المالية. كانت حكومة الولايات المتحدة قد عرضت لفترة حوافز ضريبية لجعل تسخين الماء بالطاقة الشمسية بديلاً مجدياً وتقدمت التكنولوجيا بعض الشيء قبل أن تسحب الحكومة دعمها. لكن تسخين الماء بالطاقة الشمسية رغم ذلك لم يحصل على تغلغل واسع في السوق حتى في ولايات «الحزام الشمسي» حيث كانت

التكنولوجيا تعد بمنافع مالية. كانت المشكلة تكمن بصورة رئيسة في العملية الاجتماعية الأساسية التي جرى تبني التكنولوجيا من خلالها.

خضعت الأنماط السلوكية للناس لدراسة قام بها علماء الاجتماع عند تبني تكنولوجيا جديدة (Rogers and Shoemaker, 1971). (وتشمل التكنولوجيا الجديدة بالمناسبة أي ابتكار في طرق إنجاز أهداف عملية فيما إذا ابتكرت آلية عاملة أو لم تبتكر). وتدعى العملية التي يجري تبنيها بصورة واسعة بـ«عملية الابتكار» (Innovation Process). وعند تتبعها زمنياً نراها تأخذ عادةً شكل منحنى S كما في الشكل 2-1. ومنحنى S معروف بالطبع من بحثنا في استغلال الموارد الطبيعية، ويبدو أنه قابل للتطبيق على السلوك التكنولوجي للإنسان بصورة عامة. سيبين منحنى S لعملية الابتكار العدد التراكمي لعمليات تبني تكنولوجيا جديدة مقابل الزمن. ويكون التبني في مرحلة البداية لوغاريثمي حيث تكون وتيرة الزيادة عند نقطة معينة في الزمن متناسبة مع عدد عمليات التبني عند تلك النقطة. وتمثل المرحلة الأخيرة تشبع السوق مشيرة إلى حدود التبني مثلما حدث مع الكثير من الأدوات المنزلية الكهربائية.

يمتلك الأفراد الذين قاموا بالتبني في كل مرحلة من هذا النمط الزمني للابتكار صفات مميزة. ففي المرحلة الأولى المبكِّرة مثلاً تميز المتبنون بأنهم من المجازفين المتحفزين كي ينظر إليهم كواضعي التوجه. وكان المتبنون الأوائل في سوق التسخين بالطاقة الشمسية على الأغلب أناس أغنياء جيِّدي الثقافة ويتحملون الفشل مالياً في استثمارهم لكي يكونوا الأوائل في تلك التكنولوجيا. وقرار أن يكون المرء من أوائل متبني الفكرة ليس على أي حال قضية من الصنف الاقتصادي حصراً، لأن العديد من الناس في الطبقة الاجتماعية ـ الاقتصادية نفسها ليسوا بتلك الروحية المغامرة. لذا كان أوائل المتبنين من صنف اجتماعي خاص وذوي وشخصية متفردة.

نرى من بَعد المتبنين المبكرين، التابعين المبكرين. وهؤلاء أفراد مبتكرون غير أنهم غير مستعدين بتلك الدرجة ليتحملوا المجازفة الأولية في تكنولوجيا غير معروفة. وربما يتأثرون بحقيقة أن جيرانهم الأكثر ابتكارية منهم قاموا بشراء نظام شمسي وحسب لكنهم لا ينتظرون بالضرورة كي يروا تجربة جارهم وما ستكون عليه، ومع ذلك فهم يميلون إلى التأثر بجيرانهم أكثر من تأثرهم بالإعلان.

وهذه الطريقة لبناء الثقة في التكنولوجيا الجديدة هي مثال لما يدعوه علماء الاجتماع «عملية التشبيك» (Networking). ويشير هذا التعبير هنا إلى الاتصالات والتأثير بين الأشخاص حيث يكون المساهمون في أغلب الأحيان غير واعين بمساهماتهم في عملية ابتكار وانتشار تكنولوجيا جديدة في المجتمع.

مع انتشار عملية التبني نواجه التابعين المتأخرين. ونحن هنا قد خرجنا على وجه التأكيد من الجزء اللوغاريثمي من منحنى التبني. وإذا ما كان علينا التحرك نحو المستقبل وإلى تبني أكثر تأخراً فسنبدأ في الدخول في جزء التشبع من المنحنى. ولم تصل تكنولوجيا التسخين بالطاقة الشمسية مرحلة التابعين المتأخرين ناهيك بمرحلة الإشباع. إلا أن تكنولوجيات أخرى تسلقت منحنى S في السنين الأخيرة لتصل إلى أجزائه العليا بسرعة أكبر. ويمثل الحاسوب الشخصي مثالاً جيداً على ذلك. وقد كان في نهاية السبعينيات في مرحلة التبني المبكرة، غير أن العقد التالي شهد بيع ملايين الحواسيب.

وأحد أسباب نجاح الحاسوب الشخصي يعتمد على توسع استخداماته (وفائدته) وانخفاض كلفته. غير أن عوامل أخرى كانت ذات أهمية في تخطي المقاومة التي واجهت التبني. فالاتصالات ـ بشكل شبكات بين الأشخاص في البداية وبعدها بهيئة أوساط عامة بعد ذلك ـ ساعدت على تخطي الحواجز النفسية وبخاصة التخوف من تعقيد التكنولوجيا الجديدة. وبدأ سوق الحاسوب الشخصي أيضاً يعرض ما يدعوه علماء الاجتماع العملية التجريبية (Trialability) والتي قد تكون مطلوبة لمرحلة التابعين المتأخرين. والتجريبية في جوهرها هي تقدير ما إذا كانت التكنولوجيا الجديدة عملية وملائمة للفرد. ويرغب التابعون المتأخرون أن يعرفوا : هل توجد هناك مؤسسات ووسائل لتصليح المعدات وهل ستكون خدمات التصليح متيسرة بسهولة؟ وهل ستكون كلفة التصليح معقولة؟ وهل أن المنتج مكفول ضد العطب؟ وهل يوجد تقويم أداء معتمد للتشغيل الاعتيادي؟

والإصلاح والكفالات والتقييم ليست إلا عوائق في التبني. وبعبارة أخرى فإن عدم وجود مؤسسات في المجتمع لتسهيل تبني التكنولوجيا يتطلب ضرورة تأسيسها قبل أن يتوقع حدوث انتشار كبير للتكنولوجيا. ولا يقتصر الأمر على وجود أعمال تصليح

ونظام موثوق لاختبار الأداء (من قبل الحكومة أو الصناعة)، بل يجب أن يكون هناك نظام مؤسساتي (أكان عاماً أم خاصاً) لتوفير حماية للمستهلك لتشخيص وإنهاء الممارسات غير الأمينة. فالنظام الشمسي لتسخين الماء بحاجة إلى ما يعادل الدرجة والضمان المسجلين على لوحة اسم مرجل الماء الساخن. وأحد أسباب الاختراق البسيط فقط للسوق المتوقع في نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات يتمثل بحسب رأي المراقبين في فشل مصنّعي المعدات الشمسية البيتية في توفير مثل هذه الضمانات المؤسساتية (انظر أعداد مجلة *Solar Engineering and Contracting* من تلك الفترة).

العوائق القانونية

قد ينتج من التساؤلات القانونية أيضاً، عوائق في سبيل تبني التكنولوجيات الجديدة. فرجال الأعمال ممن رأوا في السبعينيات الإمكانات في توليد الكهرباء في مواقع منتشرة اكتشفوا أيضاً عوائق قانونية تحول دون تسويق الطاقة. وكانوا قد اقترحوا استخدام عدد مختلف من التكنولوجيات البديلة: ومنها التوليد المزدوج والمحطات الكهرومائية الصغيرة والتوليد بالطاقة الشمسية أو بطاقة الرياح (انظر الملحق ج). غير أن شركات الكهرباء المحلية رفضت شراء الكهرباء المنتج بغض النظر عن طريقة التوليد المقترحة. وبسبب تحكم شركات الكهرباء المحلية بشبكة توزيع القدرة وبسبب حاجة مبتكري التوليد في مواقع منتشرة للربط مع تلك الشبكة قامت شركات الكهرباء المحلية واقعياً بقطع الطريق أمام تطوير مثل هذا النوع من الطاقة البديلة. وكانت القوانين التي تحكم شركات التوليد المحلية تؤيد ذلك إذ إنها منحتهم تحكماً احتكارياً. وبعبارة أخرى، لم تكن مشكلة مبتكري المواقع المنتشرة تقنية أو مالية أو اجتماعية، بل كانت قانونية حصراً، فقد كان لشركات الكهرباء المحلية الحق قانوناً في رفض فتح السوق.

كانت هذه الشركات تتصرف في الباب الأول لمصلحة المساهمين فيها. ومع ذلك فإن المشرعين الذين كانوا يرعون مصالح الجمهور بصورة شاملة كان لهم منظور مختلف. فقد أدرك المشرعون في كل من المستويين الاتحادي والمحلي أن قوانين شركات الكهرباء المحلية التي شُرِّعت في عهد سابق لتعزيز توسع شبكات الخدمة كانت الآن تُستخدم لمنع تبني مصادر طاقة بديلة – وهي مصادر بديلة امتلكت قيمة اجتماعية واقتصادية في زمن تقلص الموارد المحلية. وتمثلت النتيجة في

تشريع على المستوى الاتحادي[2]. وكذلك في بعض الولايات تطلب من شركات الكهرباء أن تقوم بعمليات شراء بسعر عادل. وتلا ذلك تحرك على المستويين الاتحادي والولاياتي للبدء في إعادة هيكلة صناعة الكهرباء بما يسمح لمنتجي القدرة المستقلين (من غير شركات التوليد المحلية) التنافس في السوق المفتوحة لبيع القدرة الكهربائية[3].

وقد أثرت القوانين القديمة أيضاً في تبني أنظمة توليد الطاقة الشمسية الحديثة. وتدور المشكلة حول حقوق المستثمر في نظام طاقة شمسي، في الحصول على تدفق غير محجوب لنور الشمس. إن قضية الوصول هذه إلى نور الشمس تعالج الخلافات التي يمكن أن تنشأ بين مالكي عقارات متجاورة عندما يسبب البناء أو الأشجار في إحدى البنايتين ظلاً على المجمع الشمسي للبناية المجاورة.

وكان هناك عدة مقاربات اقترحت لحل مثل هذه الإشكالات. أحدها يدعو إلى منح مالك المجمع الشمسي وصولاً أبدياً إلى الشمس. وتعود قوانين من هذا النوع اقترحت في كاليفورنيا إلى مبدأ النوافذ في القانون العرفي الإنجليزي القديم*. وفي القانون العرفي القديم كان اهتمام صاحب البيت ينحصر ببساطة بمستوى الإنارة بدل تجميع الطاقة الشمسية. ومع ذلك فإن هذا المبدأ الاستبدادي يتعارض مع حقوق دستورية أخرى لأنه يحدد حقوق مالك البناية الأخرى في تطويرها. لذا فإن هذا النوع من القانون لم يستخدم بصورة واسعة في الولايات المتحدة. وقد حاول آخرون في الحقيقة أن يبرهنوا على التطرف الآخر وهو أن الحق المطلق الوحيد هو لنور الشمس غير المعاق من الأعلى مباشرة أي بصورة عمودية.

لقد جرى تفحص المبادئ القانونية القابلة للتطبيق عن الوصول إلى نور الشمس وذلك لتعزيز تبني مثل هذه التكنولوجيا مع الحفاظ على الحقوق الدستورية في نفس الوقت (A Forum on Solar Access, 1977). وربما يكون المبدأ الأكثر قابلية للتطبيق

---

2 ـ شرّع قانون تنظيم سياسة المنافع العامة عام 1978 وكان جزءاً من خطة الطاقة القومية الثانية للرئيس كارتر. وقد طلب القانون من بين أشياء أخرى أن تقوم شركات الكهرباء بشراء القدرة الكهربائية عند «كامل الكلفة المتجنبة». وهذا يعني أن على الشركة دفع مبلغ لكمية القدرة التي تشتريها يساوي ما كان سيكلفها لو أنها ولدته بوسائلها.

3 ـ انظر: «Power Brokers – Utilities Brace for New Competition», Special Issue, *IEEE Spectrum*: July 1966.

* يقوم المبدأ الإنجليزي القديم أن المرء لا يستطيع إقامة بناء يحجب نور الشمس عن نافذة جاره. ورغم عدم تطبيق هذا القانون في أميركا ببناياتها عديدة الطوابق غير أن بعض المحاكم بدأت تلجأ إليه مؤخراً في ما يخص معدات توليد الطاقة من نور الشمس.

في هذا الخصوص هو المبدأ المدعو (التسهيل الشمسي Solar Easement). والتسهيل الشمسي مماثل للتسهيل الأرضي الذي يسمح في استخدام قطعة من الأرض مملوكة لشخص ما من قبل شخص ثان (عادة للوصول إلى قطعة أرض أخرى) بواسطة اتفاق أو عقد. ويتضمن الاتفاق عادة دفع نقود مقابل استخدام التسهيل. ويقوم مالك المجمع الشمسي في هذه الحالة بالتفاوض عن تسهيل شمسي لضوء الشمس حيث يتعهد جاره الامتناع عن حجبه عنه أو عنها. ولم يوضع حل للقضايا القانونية حتى الآن. ويتطلب الأمر خبرة بالقوانين المختلفة وعديد من المرافعات في المحاكم قبل حصول اتفاق عام على الصيغة القانونية الأفضل. وفي الوقت ذاته ربما تشكل المشكوكية القانونية حاجزاً مؤسساتياً أمام تطوير الطاقة الشمسية.

تكنولوجيات المدى المتوسط

التكنولوجيات متوسطة المدى هي تلك التكنولوجيات الممكنة عملياً غير أنها لا تزال بعيدة من الاستخدام الواسع. ولم يجر تطوير أي منها إلى حد تحويلها تجارياً. ويمكن حالياً استخدام نماذج عاملة لتطبيقات محددة وهي في أغلب الأحيان نماذج ريادية. والشيء الأهم هو أن الإنتاج بواسطة هذه النماذج العاملة أو تطبيقها غير ممكن اقتصادياً.

تمتلك تكنولوجيات المدى المتوسط إمكانية الحلول محل أنواع الوقود التقليدي الذي يستخدم في المجتمع على مجال واسع. ويوفِّر بعضها، مثل الوقود التركيبي أو أنواع الوقود الأحفوري البديلة بدائل مباشرة للنفط والغاز الطبيعي. أي إن الخواص الفيزيائية والكيميائية ستكون غير قابلة للتمييز عن أنواع الوقود التقليدية (انظر الفصل الحادي عشر). وسوف لن تكون هناك حاجة إلى توفير معدات رأسمالية جديدة لكي يجري توزيع واستخدام هذه الأنواع لأنها ستباع في الأسواق نفسها مثل أنواع الوقود التي حلت محلها. أما التكنولوجيات الشمسية فهي من ناحية أخرى توفر ما يمكن أن ندعوه بديلاً غير مباشر. وستقوم بتوليد الحرارة أو القدرة الكهربائية من خلال تحويل ضوء الشمس وهناك على أي حال حاجة لمعدات جديدة في هذه الحالة.

تتراوح الطاقة المتاحة التي يمكن أن توفرها تكنولوجيات المدى المتوسط بين الهائلة إلى التي لا تنفذ. فالوقود التركيبي يمكن اشتقاقه من الفحم أو من الكتلة الحيوية. والفحم كما رأينا في الفصلين الثاني والخامس مورد هائل الحجم بينما

يمكن للنوع الثاني إذا ما جرت إدارته بصورة صحيحة (انظر الفصل الخامس) أن يكون متجدداً وهو بذلك عملياً لا ينفد. والبدائل الأخرى كبيرة بصورة مشابهة. فالرمال القيرية في نصف الكرة الغربي وخاصة في فنزويلا وكندا تحتوى على موارد تفيض عن الاحتياطيات المعروفة للنفط. أما رواسب زيت السجّيل في غرب الولايات المتحدة فتحتوي على ما يقارب تريليوني برميل من النفط أو ما يعادل استخدام 400 عام داخلياً على نفس معدل الاستخدام. أما الغاز الطبيعي غير التقليدي فموارده في موضعها تفوق الاحتياطيات التقليدية حسب بعض التقديرات بخمسة أضعاف*.

ويتوقع أن توفر التكنولوجيات الشمسية على المدى التوسط كميات هائلة من التسخين في الصناعة وتضيف إلى إمكانيات التوليد الكهربائي بصورة بارزة. ولما كانت هذه التكنولوجيات في الحقيقة تستغل ضوء الشمس لذا فهي توفِّر إمكانية استغلال مصدر للطاقة يعتبر أكثر من متوفر. غير أن التكنولوجيات الشمسية على المدى المتوسط على خلاف تكنولوجيات المدى القريب مثل تسخين الماء لم تقترب من مرحلة الاستثمار التجاري. وهناك مع كافة تكنولوجيات المدى المتوسط في الحقيقة حاجة إلى قدر أكبر من التطوير قبل الوصول إلى الجدوى الاقتصادية و/ أو التكنولوجية لكي يجري تبنيها. حتى إن التسهيلات الضريبية في الوقت الحالي غير كافية لتشجيع الناس على تبني هذه التكنولوجيات.

إمكانية الإنتاج الكثيف

يجب أن تكون إمكانيات المدى المتوسط ذات كفاءة سعرية للمستهلك وللمنتج. ويجب على أي تكنولوجيا لتصبح مستخدمة بصورة واسعة أن تكون قابلة للإنتاج الكثيف بكلفة مجدية. فمصانع الوقود التركيبي مثلاً يجب أن تكون قادرة على معالجة مئات آلاف الأطنان من مادة التغذية (الفحم أو الكتلة الحيوية) في اليوم لتكون مجدية من حيث الكلفة ولتصبح تكنولوجيا مهمة. وكانت الولايات المتحدة قد باشرت في نهاية السبعينيات خلال أزمة الطاقة ببرنامج تطويري للوقود التركيبي[4].

* لم يتطرق المؤلف إلى بلورات الغاز المائية (Gas Hydrates) وهي بلورات تجمع جزيئات الماء مع غاز الميثان وتوجد بكميات هائلة جداً في قاع المحيطات وأيضاً في بعض الأماكن الباردة على اليابسة وإذا ما طورت طريقة ناجحة اقتصادياً وتقنياً لاستغلالها فيمكن أن تكفي البشرية بوتيرة الاستخدام الحالي للوقود لبضعة آلاف سنة.

4 ـ بدأت حكومة الولايات المتحدة في نهاية السبعينيات برعاية مشاريع الوقود التركيبي من خلال وزارة الطاقة (USDOE) وشركة الوقود التركيبي (SFC) التي أوجدت خصيصاً لهذا الغرض.

وكان الهدف الأصلي لذلك البرنامج إنتاج طاقة تساوي مليوني برميل فقط في اليوم. و يتطلب ذلك معالجة نصف مليون طن من الفحم يومياً على المستوى القومي. وكانت أكبر المصانع الريادية المصممة في الولايات المتحدة قادرة على مناولة 15000 طن في اليوم فقط ولم تتقدم معالجة الوقود التركيبي إلى ما هو أكثر من هذه السعة إلا لمصنع واحد فقط. ويجب تنفيذ تطويرات مشابهة في المعالجة إذا ما كان الوقود الحيوي سينتج على مجال كثيف.

وتمثل عملية تسخين المعالجات الصناعية نوعاً مختلفاً من الإعاقة نحو الإنتاج الكثيف. ولكي تكون التكنولوجيا تنافسية من حيث الكلفة[5] يجب أن تكون المعدات الشمسية المستخدمة ذاتها مصنوعة بطريقة غير مكلفة باستخدام تقنيات الإنتاج الكثيف (انظر الفصل الحادي عشر). ولن تكون عملية تسخين المعالجات الصناعية قادرة على الانتقال من المدى المتوسط إلى الطور التجاري حتى يجري تطوير مثل هذه التقنيات الإنتاجية. ومع ذلك لا تبدو التطويرات التقنية المطلوبة لهذا النوع من الإنتاج الكثيف كبيرة. فليس من الضروري أن تظهر اختراقات رئيسية. إن المطلوب بالأحرى هي مجموعة من الابتكارات الهندسية العملية وتحسينات في التصميم.

والقول إن الاختراقات الرئيسة مطلوبة لا يضمن على أي حال التبني المبكر أو حتى المسار السلس نحو التبني في النهاية. ويتطلب التطوير الهندسي الاعتيادي جهوداً ووقتاً لكي يتقدم. استغرق العمل في واحدة من منشآت تصنيع الوقود التركيبي التي شيدت لغرض عرض التكنولوجيا، بدءاً بالتصميم وحتى إنجاز بناء النموذج الريادي خمس سنوات. وما إن يتم بناء النماذج الريادية فستحتاج إلى سنوات من العمل والاختبار لإثبات أن التصميم الأساسي لا يتضمن أي أخطاء جسيمة. ولما كانت الأخطاء شيئاً متوقعاً في تطوير النموذج الريادي فيمكن أن يستغرق الأمر سنين قبل أن يصبح مقبولاً تجارياً.

الاختراقات التكنولوجية

هناك مشكوكية في برامج التطوير التكنولوجي الأكثر وضوحاً في معالمها. وإن لم يكن ذلك في النجاح النهائي لآخر تصاميمها فهو على الأقل في الوقت المطلوب

5 ـ إن قضايا الجدوى الاقتصادية والفنية مشتبكة بالطبع هنا. واختبار الجدوى هنا هو في إمكانية إنتاج الطاقة بطريقة ذات كفاءة سعرية.

والذي ستستغرقه لكي تحرز النجاح. وعند وجود حاجة إلى نوع من الاختراق العلمي تتضخم عوامل الشك ويتصف الإطار الزمني للمشروع بتعاظم المشكوكية التي تحيط به.

تمثل الفولتائية الضوئية ـ وهي التحويل المباشر لضوء الشمس إلى تيار كهربائي ـ تكنولوجيا بدت فيها الحاجة إلى اختراقات علمية. وبدت هذه خلال السبعينيات والثمانينيات قريبة المنال لكنها لم تتحقق. وقد حدث بعض التقدم عبر العقد المنصرم في أشباه الموصلات للتحويل الضوئي – الفولتائي، رغم استمرار وجود حاجة لتقدم أكثر (انظر الملحق ج).

إن التحويل الضوئي – الفولتائي تكنولوجيا فاعلة ولها عدد من التطبيقات المحدودة حالياً مثل توليد الكهرباء في المناطق النائية. غير أن ما كان متوقعاً منها كان أكبر، فقد ارتأى البعض صفوفاً طويلة من خلايا التحويل الشمسية توفر القدرة للصناعة، كما توفر إضافات رئيسية إلى تجهيزات الكهرباء وخاصة في المناطق المشمسة. غير أن هذا لم يحدث لأن كلفة الاستثمار كانت عالية جداً. وتركزت الجهود الهندسية على تحسين الكفاءة لكي نستحصل قدرة أكثر من كل خلية شمسية، وعلى التقليل من كلفة إنتاج الخلايا. وأي تحسين في هذين المجالين سيخفض من كلفة الواط الواحد من حمل الذروة. غير أن التحسينات كانت مطلوبة لإيصال الكلفة إلى مستويات تنافسية.

لقد هدف مصنعو الخلايا الضوئية – الفولتائية إلى تحسينات في مادة الخلية الأساسية (أشباه الموصلات) وفي تقنيات مناولتها. فالتقنية الأصلية مثل ما يستخدم عامة مع اشباه الموصلات كانت في تنمية بلورات أحادية خالية من العيوب، من السيليكون أو زرنيخيد الغاليوم (Gallium Arsenide) أو أي مادة صلبة متبلورة أخرى. ولما كانت طبقة رقيقة جداً قرب السطح هي الفعالة في التحويل الضوئي ـ الفولتائي كما إن المواد المتكونة من بلورة واحدة غالية جداً لذا انصرفت الجهود لتشريحها إلى طبقات رقيقة. ومع ذلك فقد نجم عن هذه الجهود كلف تصنيع عالية جداً آخذين بالاعتبار المساحة السطحية الكبيرة لصفوف الخلايا الشمسية المطلوبة لإنتاج كمية كبيرة من الكهرباء.

لقد بذلت جهود قبل فترة وجيزة لتطوير شبه موصل غير متبلور[6]، يمكن ترسيبه بشكل غشاء رقيق على صفائح من مادة أقل كلفة. ورغم التوقعات المتفائلة للنجاح (وبعض الإدعاءات غير المدعمة أحياناً من بعض الأفراد) لم تحصل أي اختراقات في هذا الاتجاه لتقليل كلف الإنتاج.

غير أن إعلاناً صدر في وقت مبكر عام 1988 عن معهد بحوث الطاقة الكهربائية أعطى بعض الأمل للمستقبل. فقد ابتكر العمل المختبري خلايا جديدة ذات كفاءة تصل 30 في المئة وهو قريب جداً من الحد النظري للتحويل ويبلغ ضعف كفاءة الخلايا المنتجة تجارياً آنذاك أو يزيد (انظر الملحق ج). والإنتاج الأكبر للقدرة من كل خلية يقلِّل الحاجة بالطبع لتخفيض كلفة الصنع، وربما تُوصل الخلايا الجديدة تكنولوجيا التحويل الفولتائي الضوئي إلى موقع أقرب إلى الاستخدام على مدى أوسع. والتطوير الجديد ليس إلا خطوة في ذلك الاتجاه. ورغم أن هذه الخلايا الجديدة تعد بتقليل الكلفة، إلا أن ذلك لم يتحقق في الإنتاج التجاري. وستكون هذه الخلايا رغم كفاءتها، بحاجة إلى هندسة إنتاج معقدة، وتشير التخمينات، حتى في تلك الحالة، إلى أن الخلايا من دون تحسينات إضافية لن تكون منافسة من حيث الكلفة للمصادر التقليدية (مثلاً لتوليد الكهرباء وقت الذروة في الولايات المشمسة)[7]. وستكون هناك حاجة على أغلب الإحتمالات إلى تحسينات إضافية للخلايا وتطوير لتقنيات التصنيع واختبارات موقعية قبل استخدامها بصورة واسعة.

التكنولوجيات البديلة وأسواق الطاقة

إن القول أن الفولتائيات الضوئية أو أي تكنولوجيا جديدة قابلة للحياة اقتصادياً،

---

6 ـ لا تمتلك المادة اللابلورية (Amorphous) بنية بلورية طبعاً أو شكلاً هندسياً محدداً مثل ما تمتلكه البلورات الكاملة عادة ولا تنفلق عبر سطوح فلع كما تفعل البلورات. وتعزا هذه الخواص إلى الترتيب المنتظم للذرات بصورة تكرارية على المستوى المجهري فيما يدعى مشيك البلورة.

7 ـ يعقتد الباحثون أن الإنتاج الكثيف لهذه الخلايا الجديدة ما أن يبدأ حتى تنخفض الكلفة للواط الواحد إلى المدى بين 2 و3 دولار للمنشآت الكبيرة لألواح قادرة على إعطاء حمل ذروة بحدود 100 ميغاواط. وستكون الكلفة الرأسمالية أقل مما هي لمعظم المنشآت النووية والمنشآت الكهرومائية الكبيرة. ومع ذلك فإن كلفة الطاقة الشمسية من هذا النوع ربما تبقى عالية لأن عامل التوفرية سيكون بحدود 30 في المئة فقط حتى في أكثر المناطق تمتعاً بالشمس في القطر. وعامل التوفرية كما لاحظنا في الفصل التاسع حاسم في تحليل كلفة الطاقة الكهربائية من منشآت التوليد. وعلينا أن نلاحظ في الوقت ذاته أن الطاقة الشمسية لا تستخدم وقوداً وربما تكون كلفتها التشغيلية منخفضة. ومن الممكن أن تجعل تطويرات أخرى هذه الخلايا أو أخرى مطورة منها مجدية من حيث الكلفة عما قريب وذلك لحمل الذروة في بعض مناطق الولايات المتحدة وغيرها.

فذلك يعني أنها قادرة على عرض منتوجها بسعر تنافسي في سوق ذلك المنتج. وإذا ما كان المنتج معوضاً مطابقاً، مثل الوقود التركيبي بدل النفط، فيجب أن يكون السعر مساوياً أو أقل من سعر المنتج الذي سيحل محله. وإذا ما كانت بعض خواص المنتج الجديد تختلف بعض الشيء عن المنتج الحالي فيجب أن يكون السعر لا يزال مغرياً للزبون بحيث يفضله على المنتج الحالي. وهذا صحيح بغضّ النظر عمّا إذا كان المنتج الجديد بديلاً مباشراً أو غير مباشر.

هذا ويجب أن يكون السعر السوقي لأي منتج بالطبع أكثر من كلفة إنتاجه. وبخلاف ذلك، سوف لا يتمكن المُنتِج إلا أن يبيع منتَجَه بخسارة. إن إنتاج أي منتج ـ وسعره السوقي ـ يجب أن يشملا كلفة الاستثمار والتشغيل والعوامل الداخلة في الإنتاج (انظر الفصل الرابع). وفي حالة الوقود التركيبي يجب أن يكون سعر مواد التغذية منخفضاً. وتبقى مشكلة خفض كلفة رأس المال الأولية وكلف المعالجة إلى درجة يمكن معها أن يسعر المنتج ـ الوقود التركيبي ـ بسعر يقارن بسعر النفط أو الغاز الطبيعي اللذين يهدف أن يحل محلهما. ولا يوجد بالنسبة إلى المستخدم من مقياس غير السعر ذلك لأن المفروض أن يكون الوقود التركيبي بديلاً مباشراً يمكن استخدامه لتشغيل المعدات الرأسمالية الموجودة. ومع ذلك بيّنت لنا التجربة حتى اليوم إما أن سعر النفط التقليدي يجب أن يرتفع بصورة كبيرة، أو أن تكنولوجيا إنتاج الوقود التركيبي يجب أن تتحسن، قبل أن تقترب هذه «المعوضات» من التنافسية السعرية.

ومن الناحية الأخرى فإن ما يحدد التنافسية الاقتصادية في حالة التكنولوجيا الشمسية هو التوفير الصافي الذي يبرز عند مقارنة سعر المعدات الجديدة المشتراة في السوق (بما فيه كلفة الفائدة على رأس المال المستدان) بكلفة مصادر الطاقة التقليدية بالنسبة إلى المستخدم. ولا يتكبد مستخدم الطاقة الشمسية إلا نفقات تشغيل محدودة جداً ـ إذ لا يوجد أي وقود ولا توجد إلا نفقات تشغيلية ضئيلة. وما يجب أن يقتنع به المستخدم هو أن الكلفة الأولية تمثل توفيراً مقارنة بالمصادر التقليدية حيث تكون النفقات المستمرة للوقود والصيانة أكبر. وهناك بالنسبة إلى التكنولوجيا الشمسية والأنواع الأخرى من البدائل غير المباشرة عوائق أكبر يجب تخطيها لأن على المستخدم أن يستثمر الآن مبلغاً كبيراً من المال لمردود تقديري غير مؤكد من التوفير المستقبلي.

والشك الذي يعتري التعاملات التجارية سيؤثر بالطبع في استعداد المستثمرين أو الساعين إلى الربح لدعم مجازفات تطوير غالباً ما تكون مطلوبة لجعل التكنولوجيا قابلة للحياة. فقد لا يكون ارتفاع كبير في سعر النفط كافياً لتشجيع المستثمرين في تصنيع الوقود التركيبي لعدة سنين آتية، وحتى يتبين بصورة واضحة أن الارتفاع في سعر النفط دائمي وليس وقتياً. وقد كان هذا صحيح على وجه الخصوص في السنين الأخيرة حيث تذبذبت الأسعار وخسر المستثمرون الذين سارعوا في الاستثمار. وكان الهبوط في أسعار النفط أوائل الثمانينيات سبباً في جعل عدد من التكنولوجيات البديلة التي افتُكِر أنها قاربت مرحلة الحيوية ترتد لتصبح غير اقتصادية في ظروف السوق المتغيرة. واعتمد الاستثمار في إنتاج المُجمّعات الشمسية لتسخين الماء في المنازل، ومشاريع مختلفة للوقود التركيبي وأنواع الوقود الأحفوري غير التقليدية على الدعم المالي الخاص إلى حد ما. وقد فشل العديد من هذه الاستثمارات بعدئذٍ.

والحقيقة أن تطوير نفط وسوائل السجّيل والوقود التركيبي المشتق من الفحم تعرّض هو الآخر لتناقص الأسعار مرتين بفعل حالة السوق. وكانت البحوث في نفط السجّيل قد بدأها معهد المناجم الأميركي عام 1916، وعجلت الحرب العالمية الثانية من البحث فيها، وفي عام 1944 شرّعت الحكومة قانون الوقود التركيبي لتطوير السجّيل والوقود المشتق من الفحم وبقية أنواع الوقود التركيبي. ومع نهاية الأربعينيات كانت بعض المشاريع الريادية قد أكملت، كما بُوشر ببناء مشاريع إنتاجية أولية. غير أن هذه كانت فترة توفرت فيها كميات كبيرة من النفط رخيص الثمن من الشرق الأوسط بصورة رئيسية. ولذلك السبب (وللضغوط السياسية من الصناعة النفطية كما ادعى البعض، انظر: Blair, 197. و Commoner, 1979 في مراجع الفصل الثاني) أوقف قانون الوقود التركيبي هذه المشاريع في بداية الخمسينيات.

وتكررت عملية البدء ـ التوقف هذه بالطبع في السبعينيات والثمانينيات. وقادت هموم توفير الطاقة إلى مشاريع تطوير مدعومة حكومياً في البداية مثلما أدت إلى استثمارات من قبل القطاع الصناعي الخاص في مشاريع الوقود البديل الريادية. ثم قامت حكومة الولايات المتحدة في أوائل الثمانينيات مع ازدياد الهبوط العالمي لأسعار النفط بالتوقف عن الدعم. وذلك ما فعله الداعمون من القطاع الخاص في الأغلب أيضاً. وانفردت جنوب أفريقيا فقط باستمرارها في تطوير الوقود التركيبي في

العقود التي تلت الحرب العالمية الثانية وأكملت عام 1983 بناء منشأة أولية تنتج 58000 برميل في اليوم من الوقود التركيبي. ومع ذلك كان على حكومة جنوب أفريقيا أن توفر دعماً مستمراً لأن المنتج لم يكن تنافسياً من الناحية السعرية في الحالة السائدة في السوق النفطية آنذاك.

العوامل البيئية المجهولة

تشمل الشكوك حول الاستخدام الكثيف لبعض تكنولوجيات المدى المتوسط مخاطر غير واضحة أو غير مرئية قد تصيب البيئة والسلامة. وكان هناك ميل للتغاضي عن مثل هذه الهموم من قبل دعاة هذه التكنولوجيات في حماسهم حول المنافع المتوقعة منها. كما كان يجب التصدي للمسائل البيئية قبل صرف الموارد المجتمعية ـ ربما مليارات الدولارات منها ـ في عملية التطوير. واعتماداً على التكنولوجيا التي يجري التعامل معها فقد تشمل الآثار البيئية تلوث الهواء والتخلص من النفايات والمخاطر المهنية وتلوث الماء. وتكتسب القضايا البيئية أهمية خاصة عندما يتعلق الأمر بالوقود التركيبي المشتق من الفحم أو بالوقود الأحفوري البديل.

وتعطي معالجة نفط السجّيل مثالاً جيداً على ذلك. ونفط السجيل هو أساساً نوع صلب من النفط – يدعى كيروجين – محتبس في مترسبات الصخر الصلصالي. ولكي يستخرج النفط من الصخر يجب أولاً استخراج الصخر وسحقه ثم تسخينه (وهذه تدعى بطريقة الإنبيق المعوج ـ انظر الملحق ج) يجب بعدئذٍ أن يكرر النفط. وقد يصاحب كل ذلك العديد من الأخطار البيئية. فعملية الاستخراج قد تتضمن مخاطر شبيهة باستخراج الفحم بما في ذلك مرض «النيوموكونيوسيس» وربما انفجارات الغاز. ومجرد حجم المادة في المعالجة قد يبرهن أيضاً على كونها مؤذية. ولكي ينتج نفط مقداره 25 غالوناً – وذلك أقل من برميل – يجب معالجة طن من الصخر. وسيترك مليون برميل من النفط المستخرج مليوني برميل من فتات الصخر يجب التخلص منها. وتحتاج عمليات المعالجة إلى مقادير كبيرة من الماء أيضاً ـ رغم أن معظم السجّيل موجود في أراضٍ قاحلة. ولا يقتصر الأمر على إثارة مشكلة مياه وربما نزاعاً حول الحقوق المتعلقة بمصادر المياه بل يتعدى ذلك إلى كون السجّيل قاعدياً جداً، ويمكن للمياه المتسربة منه أن تلوث المياه الجارية والجوفية بطريقة لا علاج لها. ومن الواضح أن مثل هذه الآثار يجب أن تُقَلَّل إلى الحد الأدنى قبل أن تتطور هذه

الصناعة. ولا تضيف المخاطر البيئية إلى قضية السلامة فقط، بل إن ذلك يحمل معه تبعات اقتصادية. وعندما نضيف الكلفة البيئية إلى كلفة الإنتاج فربما يمنع ذلك نفط السجيل من تحقيق التنافسية الاقتصادية حتى مع ارتفاع دراماتيكي في أسعار النفط.

النزاعات في القطاع العام

إن الفترة التي تؤدي إلى تبني إنتاج كبير للوقود التركيبي والبديل يحتمل إذا ما حلت أو عندما تحل أن تكون مشحونة بالتوتر. فأنواع الوقود البديل – كما تشير إلى ذلك مشاكل نفط السجيل – سواء كانت غازية أو سائله مشتقة من الأحفوريات أو الكتلة الحيوية ربما ستنتزع كلفة بيئية. نتيجة ذلك سيولد قرار سياسي من قبل الحكومة لتبني واحداً أو أكثر من هذه الأنواع من الوقود ممانعة من قبل الجماهير المعارضة بغض النظر عن توفر المادة أو سعر الوقود التقليدي آنذاك.

وقد وفّرت مشاريع نفط السجيل في نهاية السبعينيات أمثلة لنوع المعارضة التي ربما يقابلها هذا النوع من المشاريع في المستقبل. فقد وجه المنتقدون اتهامين على وجه الخصوص ضد عمليات السجيل. فقد ادعوا أن مخلفات السجيل كانت ترشح منها كميائيات ضارة في تجهيزات الماء وأثاروا اهتماماً كذلك حول سلامة العاملين في السجّيل. وقد وضع هذا النزاع الشركات النفطية العاملة في هذه المشاريع مثل يونيون أويل وأوكسيدينتال بتروليوم في مواجهة مع المجموعات البيئية ومجموعات الاهتمام بالأمور العامة ونقابات العمال ووكالات التنظيم الاتحادية بما فيها المعهد القومي للسلامة والصحة المهنية (NIOSH) وإدارة سلامة وصحة المناجم[8] (MSHA).

ونجم عن هذه النزاعات عدد من الاتهامات لكن لم يكن هناك إلا القليل من الحلول لهذه الخلافات. ووجهت إدارة سلامة وصحة المناجم الاتهام إلى إحدى الشركات عن حادثة في أحد المناجم بسبب الاستعجال في إنجاز هدف المشروع غير أن البعض كانوا يأملون أن يكون هناك اتفاق عام على معايير السلامة المهنية والبيئية يوفّر خطوطاً إرشادية في حالة توسع كبير للصناعة. غير أن هذا لم يحدث في الحقيقة واشتكى أحد البيئيين من مشابهة هذا الموقف بموقف القدرة النووية (انظر

---

8 ـ ظهرت سلسلة من المقالات عن برامج الوقود التركيبي في جريدة *Newsday* في لونغ آيلاند اعتباراً من 28 تشرين الثاني/ نوفمبر لغاية 12 كانون الأول/ ديسمبر 1981.

Newsday في كانون الأول/ ديسمبر 12 عام 1983) حيث استمرت النزاعات لسنين من دون حل. ويمكن أن نتوقع أن أي قرار لتطوير السجيل أو أي نوع آخر من الوقود التركيبي أو من الوقود الأحفوري البديل سيسبب نزاعات عنيفة يصعب إيجاد حلول لها. وهذا بحد ذاته يضيف إلى المشكوكية في نجاح هذه التكنولوجيا متوسطة المدى وحسب.

تكنولوجيات المدى البعيد

برهان المبدأ

تحمل تكنولوجيات المدى البعيد معها أكبر قدر من الشك مقارنة بغيرها. ولا تقتصر هذه الشكوك على الإمكانية التجارية والتقبل العام كما في تكنولوجيات المدى القصير والمتوسط، بل في الإجابة عن أسئلة أكثر أساسيةً ومنها: هل بمقدور التكنولوجيا المقترحة إنجاز المأمول؟

والبرهان المطلوب يتجاوز «الجدوى التقنية» التي تفهم على أنها تقتصر على الأمور الهندسية والتصميم. فمن الممكن إنتاج الوقود التركيبي بطرق المعالجة التي سنصفها في الفصل التالي ونستطيع القول إن هذه التكنولوجيات ممكنة علمياً. غير أن أنواع الوقود التركيبي ليست قابلة للحياة اقتصادياً ولا تتمتع بتنافسية سعرية حتى الآن. ولن يتحقق ذلك حتى يبرهن على إمكانيتها على مجال واسع. فمنشآت صغيرة أولية لوحدها لن تقرر جدوى التكنولوجيا بصورة كاملة لأن مشاكل تشغيل المنشآت الكبيرة قد لا تظهر في المنشآت الأولية الصغيرة. فالاندماج النووي على خلاف ذلك لم يجرِ البرهان على إمكانيته علمياً، لذا فهو يصنف ضمن منظور المدى البعيد. ومع مثل هذه التوقعات لم نقم في الواقع حتى الآن بالانطلاق من مرحلة البحث الأولى للتطور التكنولوجي. وهناك حاجة في مرحلة البحث لإثبات صحة المبدأ العلمي لكي نعرف أن تلك التكنولوجيا تمتلك إمكانية العمل.

وتوفِّر بحوث الاندماج النووي صورة واضحة للتفريق بين البرهان على صحة المبدأ وبين جدواه التكنولوجية. ففي برنامج الاندماج يجب أن يكون المنتوج الصافي للطاقة من المفاعلات برهاناً على صحة المبدأ. ويجب أن يكون هذا المنتوج الصافي بكميات كبيرة من لينتج طاقة كهربائية مفيدة. وهكذا فنحن ما زلنا ننتظر إنجاز برهان صحة المبدأ، كما سنبحث في ذلك في الفصل الحادي عشر.

كان الهدف الرئيس الأول والدائم في برنامج بحوث الاندماج هو تنفيذ تجربة مختبرية تبين تساوي مقادير الطاقة. أي إن منتوج الطاقة من تفاعلات الاندماج يجب أن يساوي على الأقل مدخول الطاقة المطلوب لقدح التفاعل الاندماجي ومن ثم السيطرة عليه. وإذا ما استطعنا أن نعرض حالة تساوي مقادير القوة فإن مرحلة البحث التالية ستكون الحصول على غلة صافية من الطاقة. ولم يصل الباحثون خلال أكثر من أربعين عاماً في الولايات المتحدة أو في غيرها إلى نجاح في تجاربهم إلى نقطة تساوي الطاقة. لذا لم يقدم حتى الآن برهان على أن الاندماج النووي يمكن أن يكون مصدراً مفيداً للطاقة.

ويجب أن لا نعزو عدم نجاح أبحاث الاندماج النووي بصورة كلية إلى افتقاد التمويل. فباستثناء ممكن للانشطار النووي، تميزت بحوث الاندماج النووي بالاستمرارية أكثر من أي بحوث أو برامج تطويرية أخرى عن الطاقة في الولايات المتحدة. وكذلك كان العاملون على هذا البرنامج في المختبرات الوطنية والمختبرات البحثية لدى الشركات وفي الجامعات من النخبة العلمية المتميزة أكان ذلك في الولايات المتحدة أو في الخارج.

والسبب الكامن لفشل تجارب الاندماج في الوصول إلى نقطة التساوي هو صعوبة المشاكل الفيزيائية (وسيبحث ذلك في الفصل التالي). ومثل هذا التقييم لا يحظى بالقبول عند مجموعة الباحثين في الاندماج وحسب، بل إنه النقطة المركزية في انتقاد إدارة البرنامج. فهؤلاء النقاد يقرون بأن في البرنامج منذ بداياته كان يجب أن يركز بدرجة أكبر على أساسيات الفيزياء قبل محاولة القيام بتجارب نقطة التساوي والخطوات المبرمجة في ما بعدها (انظر في مراجع الفصل الحادي عشر (Science, 1995, Lidsky, 1983) وقد دارت نقاشات مشابهة في مشروع Joint European Torus أو JET الأوروبي وهو مشروع اندماج تحت إشراف دولي[9] يعالج الموضوع الذي يجري التركيز عليه. وتشير النقاشات إلى صعوبات مؤسساتية في إدارة برامج البحوث. وهناك ضغوط قوية على المسؤولين عن هذه البرامج لإظهار نتائج على المدى القريب لإدامة التمويل من الموارد العامة.

9- ظهرت تقارير عن الخلافات على إدارة البرنامج في *Physics Today* في 2 تشرين الثاني/ نوفمبر 1984.

ولا يتوفَّر لكل التكنولوجيات في مرحلة البحوث مثل ذلك الدعم الحكومي الكبير الذي حظي به برنامج الاندماج. فالموصلات الفائقة مثلاً انتقلت من صنف المدى البعيد إلى صنف المدى المتوسط بجزء بسيط من تمويل البحث الذي زود به برنامج الاندماج. كذلك كان لبحوث الفولتائيات الضوئية تمويل حكومي قليل نسبياً. وكل من الفولتائيات الضوئية والموصلات الفائقة لديها تمويل بحوث من القطاع الخاص غير أن الاستثمارات لا تشكل إلا جزءاً بسيطاً مما خصصته الحكومة لبرنامج الاندماج.

دعم البحوث

تحتاج التكنولوجيا كما هو ظاهر في المرحلة البحثية من تطورها دعماً مالياً، لكنها ذات طبيعة محفوفة بالشك إلى درجة كبيرة. ولا تتوفر أي توكيدات حول متى سيجري البرهان على المبدأ الرئيس أو إن كان ذلك سيحدث مطلقاً. ولا يوجد إلا قلّة من المستثمرين المستعدين لدعم مثل هذه المضاربات العلمية المتصفة بالمجازفة مالياً، ولا أحد منهم سيجازف بمبالغ كبيرة. نتيجة ذلك نرى أن تمويل مشاريع البحث الكبيرة مثل الاندماج يقتصر على الحكومات فقط، غير أن الحكومات هي الأخرى غالباً ما ترفض أن تنفق مواردها على أسس وعود بالنجاح وحسب من الباحثين.

وتكمن مشكلة التمويل الحكومي للبحوث ذات النتائج بطيئة الظهور في تأمين استمرارية التمويل لإتاحة فرصة للنجاح في النهاية. وتحتاج إدارة مشاريع البحوث المستمرة تكريساً مهنياً من العلميين المساهمين فيها بدءاً بسنين من التدريب أثناء الدراسات العليا في الجامعات يليها تخصص مهني ضمن المشاريع البحثية ذاتها. وتحتاج المشاريع البحثية الكبيرة، مثل تلك المتعلقة بالاندماج، أيضاً، إلى أطر تقنية عالية التدريب، وإلى مهندسي تصاميم. ويحتاج بناء العدد التجريبية إلى التعاقد مع مجهزين متخصصين للمعدات المبنية خصيصاً بحسب مواصفات الزبون، وغالباً ما تحتاج هذه المعدات إلى سنين لإكمالها. لذا فإن التمويل المتقطع أو غير المتوقع في هذه الإدارة المعقدة للجهود البحثية الكبيرة له من الآثار ما يتجاوز بكثير الأثر في مؤسسات أصغر. وهكذا نستطيع القول إن مشاريع البحوث الكبيرة لا تمتلك فرصة للنجاح من غير استمرارية طويلة المدى للتمويل.

واستمرارية التمويل الحكومي على المدى البعيد يمثل مسألة سياسية في الديمقراطيات الممثلة هنا، حيث يجري تحديد الصرف الحكومي سنوياً من خلال تشريعات. والتعهد بالتمويل على المدى الطويل أمر يصعب جداً تشريعه ذلك لأن المشرعين يُنتخَبون عادة على أساس فترات قصيرة ويكون منظورهم قد تقولب. وهناك أيضاً قضايا المسؤولية التي تقع على المشاريع الكبرى التي يوجد تعهد بتمويل طويل المدى لها لأسباب قد لا تفهم بوضوح من قبل المشرعين دائماً.

كانت هذه الصعوبات واضحة عند محاولة الكونغرس وضع برنامج بحوث طويل المدى للاندماج النووي. وقد خصص قانون ماك كورميك (شُرِّع عام 1980 وسمي باسم النائب الذي طرحه وهو م. ماك كورميك من ولاية واشنطن) مبلغ 20 مليار دولار لمشروع سريع الخطى غير أنه مرتبط بالنتائج الملموسة بدل الاستقصاء العلمي. وهدف القانون أولاً إلى تحقيق تجارب التساوي وانتهى بمثال ريادي لمفاعل يعمل بالاندماج النووي، على أن ينجز ذلك خلال عشرين عاماً. ورغم أن قانون ماك كورميك كما يبدو قد أنجز خطوة نحو التمويل المؤمن طويل المدى إلا أنه لم يبدأ حيث يجب أن يبدأ، كما شعر منتقدوه، وذلك عند البداية الضرورية ـ القضايا العلمية الأساسية.

لقد كان لنجاح التشريع على أي حال عمر قصير. فبعد تشريعه بفترة قصيرة في الثمانينيات أنهت وفرة النفط اهتمام الكونغرس بتجهيزات الطاقة. وكانت إدارة ريغان التي استلمت الحكم آنذاك مهتمّة جداً في تقليص الموازنة في جميع أوجه التمويل الحكومي غير الحربي. نتيجة ذلك، جرى تقليص برنامج الاندماج ـ رغم أنه كان استمر يتحكم بمبالغ أكبر بكثير من برنامج الفولتائيات الضوئية أو أي تكنولوجيا طاقة أخرى ـ وهذا ما أفقده مبالغ كبيرة مؤكدة لعقود قادمة.

ومن المشوق أن عدداً من مشاريع البحوث الكبرى في الولايات المتحدة وفي أوروبا نجحت في إدامة استمرارية التمويل حتى إن بعضها قد بوشر العمل به بعد فشل قانون ماك كورميك. والمثال الأول على ذلك هي المعجلات الضخمة المستخدمة في بحوث فيزياء الجسيمات. والحقيقة أن الكونغرس قد نظر في مشاريع ضخمة جديدة لتطوير معجلات فائقة حتى عندما كان يقلص تمويل مشاريع الاندماج. وقد

اتهم بعض النقاد هذه الأولويات على أنها قضية سياسية وحسب فيما اقتنع آخرون بأن من كانوا يروجون لمشاريع المعجلات تمتعوا بمهارة أكبر. ويقال إن المروجين العلميين كانوا أكثر كفاءة في عرض أهمية اقتراحاتهم باستخدام سحر فيزياء ـ الجسيمات – عالية الطاقة، الذي صوروه على أنه من تخوم المعرفة المتقدمة. غير أنهم خسروا في النهاية أيضاً، فقد ألغى الكونغرس مشروع المعجل فائق الصدمة من (Super Collider Accelarator) في تكساس عام 1994 بحيث لم يبقَ أي مشروع فيزياء عالية الطاقة في الولايات المتحدة، إنما أمل فقط في مشروع تعاوني دولي في هذه البحوث.

لقد أُقِرّ منذ زمن بأن البحوث الصرفة هي ملك عام إذ إنها نتاج المجتمع العلمي وممولة من قبل الحكومة (Teich, [et al.], 1994). وكانت المجموعة العلمية في الماضي حرة في وضع مشاريع البحوث وتخصيص الموارد واختيار أولئك الذي سيقومون بهذه المشاريع البحثية. وكان معروفاً بصورة عامة بأن العلماء يبحثون عن القواعد الأساسية والجوهر الحقيقي في كيفية عمل الأشياء في الطبيعة. وقد فهم المجتمع ضمنياً أن الفائدة من هذه الفعالية المتحررة من الأغلال ستفوق كلفتها في المدى البعيد. وفي حين أن هذه حالة مثالية، إلا أنها مع ذلك تمثل الفهم الأساسي في المجتمعات الغربية منذ بواكير العمل العلمي في أوروبا.

كان هذا الفهم يتحلل في السنين القليلة الماضية. فقد كانت الجهات التشريعية وخاصة الكونغرس في الولايات المتحدة أكثر ممانعة في تخصيص الدعم للبحوث. وقد تعرضت البحوث الصرفة للهجوم على أنها مكلفة جداً وغير ضرورية وخضعت مراراً للاستقطاع من الموازنة الاتحادية. وليس تقليص برنامجي الاندماج النووي وفيزياء الطاقة العالية إلا أمثلة على ذلك. وقد نجمت بعض هذه التغيرات في السياسة عن المنظور قصير المدى للمشرعين الواقعين تحت ضغط مستمر للإنتخابات التالية. غير أن الاستقطاعات في الموازنة قد برزت أيضاً نتيجة المعارك الأيديولوجية حول الموازنة وأولويات الحكومة. ومن خلال هذا الاضطراب بدا المجتمع وهو يفقد رؤيته للمستقبل حيث إن « العلم هو الحَد الذي لا نهاية له»[10].

---

10 ـ قام الدكتور فانيفار بوش عام 1945 وهو مدير دائرة البحث والتطوير العلمي تحت رئاسة فرانكلين روزفيلت بنشر تقرير عنوانه: (Science – The Endless Frontier: A Report to the President on a Program for Postwar =

خيارات المدى البعيد

تقدم لنا تكنولوجيات المدى البعيد كالاندماج النووي والطاقة الشمسية أملاً يصعب تصوره تقريباً. وإذا ما نجحت هذه التكنولوجيا فلن يقتصر الأمل الذي تحمله على تحسين تكنولوجيا طاقتنا، ولا إرجاء مشاكل استنزاف الموارد لعدة عقود أو قرون وحسب، إنما تعد بدل ذلك بتقديم حلول لمأزق الطاقة للبقية الباقية من تاريخ الجنس البشري. وإذا ما كان الأمر كذلك، فإن أي واحد منها سيحتل ثورة في العلم وسيحول المجتمع بطريقة جوهرية. غير أن هذه التكنولوجيات غير أكيدة النتيجة ولا يعرف مدى نجاحها. حتى ولو ما انفقت مليارات الدولارات على تطويرها. والحقيقة أن الشك يحيط بها إلى درجة تتركنا غير متأكدين من أنها لن تخلف لنا مجموعة من المشاكل غير المرئية، حتى في حال نجاحها، فإننا سنجد بعد عقود من الجهد أنها ليست الحل الواعد.

إن مثل هذه الوعود والشكوك تترك مجتمعاً مثل مجتمعنا مع سؤال كبير: هل يجب أن نستثمر بصورة هائلة في مجرد أمل أو في ما هو أكثر احتمالاً. مع أنها محدودة الحقائق؟ هل يجب أن نبذل جهداً كبيراً لنرى إذا ما كنا نستطيع الحصول على حل لمشاكل الطاقة لدينا، أم هل يجب أن نركز جهدنا على تكنولوجيات المدى المتوسط والقريب رغم أنها قد تساعدنا فقط في إحباط الحاجة إلى الحصول على حل؟

ليس هناك من حاجة بالطبع إلى اتخاذ إما/ أو. قرارات فالمجتمع قد يستمر أو يتحمّل الاستمرار بالبحث عن إجابات نهائية حتى عندما يتابع إجراءات مؤقتة. وربما يعتمد المزج في الخيارات والتوكيد في سياسة الطاقة في النهاية على الاهتمامات العاجلة أكثر مما يعتمد على حلول المسائل الكبرى. وعلى سبيل المثال:

ـ كيف يمكننا إدارة موارد الطاقة الأحفورية المحددة لدينا؟

= r Scientific Research) وأكد د. بوش في هذا التقرير أهمية الاستمرار بالزخم الذي تمتلكه البحوث والذي تطور أثناء الحرب العالمية الثانية خلال زمن السلم واحتياجاته التي ستلي وعلى رعاية حرية البحوث. وتركز نقاشات أحدث عن هذه المواضيع على «ما هو نوع العلوم الذي نريده؟» (Sarewitz, 1996).

[مما أكده د. بوش أيضاً ضرورة إيلاء اهتمام خاص للبحوث الصرفة التي كانت نادرة نسبياً في الولايات المتحدة قبل الحرب الثانية مقارنة بالبحوث التطبيقية الهادفة التي كانت تتبناها وتمولها الشركات الصناعية].

ـ أي تكنولوجيات جديدة ستساعد في إيجاد توزيع أكثر عدالة في العالم لموارد الطاقة؟

ـ هل هناك تكنولوجيات بديلة يمكن بلوغها لتقليل أثر ما يفيض عن عمليات تحويل الطاقة بما في ذلك التلوث والأخطار الإشعاعية؟

ـ أي التكنولوجيات أفضل في المساعدة على التخلص من إمكانات حدوث كوارث بيئية رئيسة مثل تأثيرات البيت الزجاجي أو التصحر أو التلوث الإشعاعي في مجال واسع؟

ـ أي من تكنولوجيات الطاقة الجديدة أفضل في إدامة النمو الاقتصادي على مستوى العالم كله؟

تعرض تكنولوجيات تحويل الطاقة الجديدة إجابات مختلفة لهذه الأسئلة. فإذا ما نظرنا في قضية المصدر القابل للاستنفاد مثلاً، فسنرى أن السياسة المبنية على تطوير الوقود التركيبي. وأنواع الوقود الأحفوري البديلة ستمدد حياة مصادر الوقود الأحفوري فقط. وسيتمثل الحل المباشر في تبني تكنولوجيات المصادر المتجددة مثل الوقود من الكتلة الحيوية (انظر الفصل الحادي عشر). فالوقود من الكتلة الحيوية يمكن أن يوفِّر الطاقة على أسس تجديدية صحيحة[11] إذا ما اتبعت أنظمة حصاد محاصيل الطاقة المستدامة أو الغابات. وإذا كان بالإمكان الوصول إلى إدارة الكتلة الحيوية على مجال واسع فربما تعوض عن الوقود الأحفوري، ونكون قد تخلصنا من مأزق نفاد الموارد الأحفورية*.

في الوقت ذاته، يمكننا التركيز بدرجة أكبر على تكنولوجيات الاندماج والطاقة الشمسية للتغلب على مشكلة المصادر القابلة للاستنفاد. كلتا التقنيتين تمنح أولاً في ضخ مصادر لا تنضب من الطاقة. يمكن بالطبع استغلال الطاقة الشمسية الآن على

11 ـ إننا نعرف مصدر الوقود أو الطاقة المتجددة على أنه ذلك المصدر الذي يعيد استكمال نفسه مثل مصادر الماء أو الكتلة الحيوية. وأبسط الأمثلة هو في إدارة الغابات حيث تكون الأشجار المقطوعة سنوياً لا تتجاوز نمو الأشجار وبذلك يستدام تجهيز الخشب. أما التكنولوجيات الأخرى التي ندعوها متجددة مثل الطاقة الشمسية فصنفها في صنف آخر وهي (غير القابلة للاستنفاد) أو المصادر المبتذلة بصورة فائقة.

* هذا مع الأسف حل طوباوي لأن الأرض الزراعية والمياه المتوفرة الآن لا تكاد تكفي لإنتاج المواد الغذائية لمليارات البشر من سكان كوكب الأرض ناهيك، باستغلالها لإنتاج الوقود الحيوي وبكميات تعوض عن الوقود الأحفوري.

أسس محدودة، أما الاندماج فلا يمكن استغلاله الآن مطلقاً. ويصبح السؤال: ما هو الطريق الذي سنختاره للتعامل مع مشكلة المصادر المستنفدة؟ فالكتلة الحيوية والطاقة الشمسية والاندماج كلها تمتلك إمكانيات كامنة عظيمة ويمكن متابعتها كلها، غير أنها كلها وإلى درجة ما عرضة للشك. وأي مصدر متجدد أو متوافر بكثرة يمكن أيضاً أن يقدم حلاً لمشاكل العالم المعاصرة والمتمثلة في توزيع الموارد (انظر الفصل الخامس). وإذا ما تم تطوير تكنولوجيا الاندماج أو الطاقة الشمسية بنجاح وأصبحتا متوفرتين فستقضيان على مشكلة قلة الوقود في المناطق الفقيرة الموارد في العالم. وفي حالة تحسين التكنولوجيا الشمسية يمكن لهذه المناطق التي تتوفر فيها الطاقة الشمسية أن تخفف نقص الموارد محلياً وأن تقلل على الأقل من الطلب العالمي على الموارد الأحفورية (انظر الفصل الحادي عشر).

وسيكون حل مشكلة النقص في موارد الطاقة خطوة رئيسة نحو تطوير أقطار العالم الثالث ونحو تقليل الفقر. فأي من الطاقة الشمسية أو الاندماج النووي يقدم إمكانية توفير القدرة للتطوير بطريقة مستدامة (Repetto ،1986، وأيضاً Brown ،1986، في مراجع الفصل الخامس). إن التوجه الحالي (وغير القابل للاستدامة)، المتمثل بالتصحر الهائل وتآكل التربة والتلوث في العديد من مناطق الدول النامية يمكن عكسها ويمكن للتنمية أن تنطلق إلى أمام.

ويمكن لتكنولوجيات الطاقة مثل الطاقة الشمسية والاندماج أو الكتلة الحيوية إلى درجة ما[12] أن تقلل من المنسكبات في العالم الصناعي. ويبدو أن الطاقة الشمسية هي الأسلم بيئياً. وأكثر أنواع المنسكبات في التحويل الشمسي هي ذات علاقة بالإنتاج الكثيف لأشباه الموصلات. كما لا توجد أي انسكابات ظاهرة في تشغيل الطاقة الشمسية. ومن ناحية أخرى، نرى أن العديد من الدول الصناعية مثل بريطانيا فقيرة جغرافيا ومناخياً في الاستخدام الواسع للطاقة الشمسية.

يجب أن لا يقتصر تفادي إمكانية حدوث تدمير بيئي رئيس على تبني بدائل متجددة أو مبتذلة بل على تجنب تلك التي تتضمن الاحتراق. فالكتلة الحيوية مثلاً رغم أنها متجددة تشكل خطراً بطريقتين: التصحر (وهذا واحد من المشاكل القائمة

12 ـ فالكحول مثلاً الذي يحترق مخلفاً ملوثات أقل بكثير.

الآن في أقطار تتطور صناعياً مثل البرازيل. انظر الفصل الخامس) وتأثيرات غاز ثاني أكسيدالكربون الناجم عن البيوت الزجاجية. ورغم أن هذا التأثير غير مؤكد، إلا أن تقليل الفرصة المتاحة له من قبل الإنسان تكمن في تقليل إنتاج ثاني أكسيد الكربون من خلال التبني الواسع لتكنولوجيات الطاقة التي لا تعتمد الاحتراق. ومع ذلك يجب أن لا يقتصر هذا على تبني تكنولوجيات الاندماج والطاقة الشمسية للحلول محل الوسائل الحالية التي تحرق الوقود لتجهيز الكهرباء وللتسخين الصناعي وتسخين الفضاءات، بل يجب أن يشمل تطوير مركبات نقل لا تعتمد مكائن الاحتراق الداخلي. ولكي يحدث ذلك يجب أن تحدث اختراقات لا تقتصر على تكنولوجيات الاندماج والطاقة الشمسية، بل في تكنولوجيا المركبات الكهربائية (انظر الملحق ج عن اختزان الطاقة).

هذا وقد يبدو عند هذه النقطة أن الحجج الآن تفضل تطوير الموارد المتجددة والمبتذلة وبخاصة الطاقة الشمسية والاندماج بدل أي من الأنواع الأخرى لأن هذه تبدو أكثر فائدة ولا تسبب إلا أقل ضرر للبيئة. إنما علينا أن نفكر بالكلفة الاقتصادية والفوائد. وليس من الواضح إذا ما كانت التكنولوجيات المتجددة والمتوفرة ستقدم فائدة اقتصادية أكبر. والحقيقة أننا إذا ما أخذنا الشك بنظر الاعتبار فإن بعض هذه التكنولوجيات قد لا تقدم أي نفع بتاتاً. ويجب على خيارات السياسة أن تأخذ بالاعتبار الشك الذي يعتري النتائج. هل علينا أن ننفق الآن مبالغ طائلة مستقطعين إياها من الخدمات المهمة الأخرى كالصحة والخدمة الاجتماعية في حين أن النتائج قد لا تعني أكثر من مجرد طاقة بكلفة عالية جداً ونمو اقتصادي أقل؟ إن فعل ذلك قد يعني حرمان وأذى لبعض الناس الآن وإذا لم تعمل البدائل كما أملنا فقد تكون النتيجة حرمان وشدّة لعدد من الناس مستقبلاً.

لا يعتمد النمو الاقتصادي كما لاحظنا في الفصل الرابع على كلفة الطاقة وحدها بالطبع. وإذا ما كانت كلفة الطاقة أكثر، فبإمكان الكفاءة والإنتاجية المحسنتين إدامة مستوى عال للمعيشة. عندها يمكن لفوائد هذه البدائل جعلها ذات اهتمام حتى في كلفة عالية قليلاً.

ومع ذلك فإن إمكانية ارتفاع أسعار المصادرالتقليدية للطاقة ستوفِّر أقوى الحجج في جانب تطوير التكنولوجيات البديلة اليوم بدل الغد، فقد استُحثت توقعات بأسعار

عالية جداً لتطوير البدائل في السبعينيات والثمانينيات. إلا أن وفرة النفط وهبوط الأسعار غيرتا توقعات الجمهور المستخدم والمستثمر لذا توارت القوة الدافعة نحو البدائل. تشير أسعار مصادر الطاقة التقليدية على المدى البعيد وخاصة النفط والغاز الطبيعي إلى ارتفاعها بشكل درامي بعد عام 2000، بحسب وجهة نظر عديد من الاقتصاديين والتكنولوجيين، وذلك بسبب زيادة الطلب وقلة التجهيز. وإذا ما كانت هذه التحليلات صحيحة فستقود إلى الحفاظية مجدداً وإلى التعويض ببدائل الطاقة عن أنواع الوقود الأحفوري. وسيبدأ التعويض بجدية عندما تصبح كلفة الإنتاج بالطرق المستحدثة أقل من الأسعار السائدة للمصادر التقليدية، وعندما يقتنع المستهلكون بأن التوجه لن ينعكس.

المسالك

كنا ركزنا في ما سبق على الكلف والمنافع التي تخص المجتمع في تكنولوجيات الطاقة الجديدة. لكن الفلاسفة في السنين الأخيرة بدأوا ينظرون إلى تطور الطاقة ذاته كخيار بين مسلكين : الصلب واللين. وكل مسلك له مترتبات اجتماعية وأخلاقية مثلما له مترتبات تكنولوجية أكثر تحديداً.

يتطلب المسلك الصعب وسائل إنتاج كثيف واسعة وهذا ما يعني في حالة الطاقة بناء محطات قدرة كبيرة المقياس أو منشآت تحويل وقود تستفيد من اقتصاديات المقياس (Economy of Scale) للإنتاج بأقل كلفة. ومع ذلك فإن المسلك الصعب – كما يراه المنتقصون منه – لن ينحصر اهتمامه بالأثر أو الأخطار البيئية فقط، بل سيتعداه إلى الإنتاج الملبي للطلب الواسع غير المقيد بأي أخلاقيات حفاظية. والمسلك الصعب ـ بانتقادية أقل حدة ـ يجب أن يرى الإنتاج الكثيف كطريقةٍ لتحسين أحوال المجتمع كله بصورة عامة، وسيعتبر أي تأثيرات عَرَضية على أنها أمور قابلة للحل من خلال تطبيقات إضافية للتكنولوجيا. وتقع محطات توليد القدرة الكبيرة العاملة بالفحم أو بالقدرة النووية ومصافي تكرير النفط في هذا الصنف، بينما ستتمثل التكنولوجيات الجديدة ذات العلاقة التي تتبع الأسلوب الصعب بالمنشآت العاملة بالاندماج أو المنشآت الكبيرة العاملة بالوقود التركيبي.

ويرى دعاة التكنولوجيا اللينة (Soft Technology) على خلاف ذلك أن الإنتاج

يجب أن يكون صغير الحجم ولامركزياً. وستُوفر الطاقة من مجمعات شمسية موقعية أو مولدات تعمل بالريح ذات أثر بيئي قليل. ويؤكد المسلك اللين كذلك على استخدام المواد المتجددة ولا يقتصر ذلك على طاقة الشمس والرياح، بل يشمل أيضاً الكتلة الحيوية والموارد المائية. ويدعو مؤيدو التكنولوجيا اللينة أيضاً إلى الحفاظ على الموارد بما في ذلك التقليل الطوعي لاستهلاك الطاقة.

المروجان الرئيسان للمسلك اللين هما شوماخر (Schumacher) (1973) ولوفين (Lovin) (1977) اللذين صاغا في الحقيقة تعبير المسلك اللين. وهم عادة يرون التكنولوجيات اللينة غير المركزية في سياق اجتماعي سياسي لامركزي من «التكامل مع الطبيعة والسياسات الديمقراطية... متماشياً مع الثقافة المحلية.... ومعتمداً على خير وسعادة الأجناس الأخرى، على أن تكون الحاجة واقتصاد الحالة المستقرة والعمالة الكثيفة متحكمة في الابتكار... وأن تكون أنماط تشغيل (التكنولوجيا والمجتمع) مفهومة للجميع». وسيكون المسلك اللين بالنسبة إلى اتباعه مصدر توتر أقل وسيعمل المجتمع بطريقة أفضل تحت ظلاله، أو كما قال أحد دعاته «تزداد الكفاءة العامة مع صغر الحجم»[13].

أشار معارضو المسلك اللين إلى كل من الفوائد التي جناها المجتمع تاريخياً من المسلك الابتكاري الصعب – الأدوات الكهربائية، النقل بالسيارات – وإلى المشاكل والتناقضات الممكنة في مفهوم المسلك اللين ذاته. ويتساءل المعارضون مثلاً كيف سيحدث هذا التحول في المجتمع الصناعي. إن إعادة التنظيم الكبرى المتضمنة، ستتطلب بحسب الاقتراح جهداً صناعياً هائلاً ومركّزاً لبناء آلاف من المجمعات الشمسية والمولدات الهوائية إضافة إلى المصانع والمشاغل الموزعة التي ستوفر لها القدرة (Florman, 1977). ويمكن في الحقيقة أن يُبرهن على ضرورة إحداث اختراقات تقنية في الإنتاج عبر المسلك الصعب، وذلك لجعل المسلك اللين واقعياً. وهذا ما يعني أن أي محاولة لإدخال المسلك اللين في المجتمع الصناعي الغربي الآن قد تكون ذات أثر تخريبي اجتماعياً وقد تسبب صعوبات اقتصادية.

لقد عُكِس نقاش دعاة المسلك اللين قبالة دعاة المسلك الصعب أيضاً في

13 ـ هذه الاقتباسات من داعية المسلك اللين روبن كلارك (Robin Clarke) من Biotechnic Research and Development في إنجلترا (كما ذكرت في Winner, 1986).

المداولات حول طبيعة وشكل التنمية المستدامة (الفصل الثاني). وحتى عندما يكون هناك اتفاق على الحاجة إلى تطبيق سياسات تهدف إلى الاستدامة يبقى هناك اختلاف في الأغلب على ما يعنيه ذلك. والاستدامة بالنسبة إلى البعض بحاجة إلى مسلك لين. ويحاول الدعاة أن يبرهنوا على بقاء مشاكل عن الاحترار الكوني والتلوث واستنزاف الموارد إذا لم تجرِ إعادة تفكير شاملة عن طبيعة المجتمع البشري. كما يحاولون أن يبرهنوا على عدم الحاجة إلى تكنولوجيا جديدة حتى إن كانت مقبولة بيئياً وقابلة للتدوير في أغلبها. وحري بنا أن نمتلك أخلاقيات «اقتصاد الحرص الكبير في الإنفاق وكبح جماح النفس وإخلاف عوائل أصغر... والعيش في بيوت أصغر وزراعة كم أكبر من الطعام محلياً والإصلاح بدل الاستبدال» (Mckibben, 1995). وعلينا تبعاً لهذا المنظور أن نوقف أولاً الفكرة المستحوذة لدينا بصورة شاملة حول أهمية استمرار التطور الاقتصادي، وهذا التطور حسب اعتقاد العديد من دعاة المسلك اللين هو أساس مشاكلنا[14].

إلا أن دعاة المسلك الصعب يريدون المحافظة على النمو – حتى أولئك الذين ينادون ببرامج تطوير واسعة المدى لتكنولوجيات الطاقة البديلة «المستدامة». ويتساءل هؤلاء: لماذا لا نستمر في المسلك الصعب ونحصل على نمو اقصادي أكبر، في حالة تمكننا من الحصول على وقود أنظف ومنتوج أقل من ثاني أكسيدالكربون؟ غير أن هذا يعني ضرورة وجود منشآت إنتاجية مركزية كبيرة وشبكة نقل واسعة وإنتاج مستمر لكميات كبيرة من السلع المنتجة والاستهلاكية في المقام الأول – والتي تستهلك موارد شحيحة.

لقد ناقش دعاة التكنولوجيات الصلبة واللينة مسألة المسلك الأفضل، ولم يقتصر ذلك على الأقطار الصناعية فقط بل شمل الدول الأقل نمواً أيضاً. ورغم أن كلا الطرفين يتفق على الحاجة إلى التطور الاقتصادي في الدول الأفقر، إلا أن دعاة المسلك اللين غير مستعدين للإقرار بأن الدول الأقل نمواً تحتاج إلى تبني التكنولوجيات الصلبة. ويؤكد هؤلاء أن على الدول الأقل نمواً تبني موارد الطاقة المتجددة لتجنب ذلك النوع من العثرات التي واجهتها الدول الصناعية. ولكي نبسط

14 ـ ظهر مثال على التهجم على النمو الاقتصادي كإعلان مدفوع الثمن من قبل الناشط البيئي ديفيد براور في *New York Times* بتاريخ 17 شباط/ فبراير 1993. وقرأ عنوانه (علم الاقتصاد هو نوع من خلل الدماغ).

الموضوع أكثر يجب أن لا تقترف الدول الأقل نمواً الأخطاء نفسها التي اقترفتها الدول الصناعية. غير أن هذا الموقف يبدو بالنسبة إلى دعاة المسلك الصعب كأنه وصفة للفقر المستمر. وسيدعون بذلك أن التكنولوجيا الصلبة ضرورية إذا ما أرادت الدول الأقل تطوراً أن تطور مستويات معيشة سكانها: أما بالنسبة إلى العثرات، فإن مشكلة وقتية مع تلوث الهواء خير من الفقر المتواصل.

علينا عند تقييم هذا الجدل أن نحتفظ بالمقاييس الزمنية في أذهاننا. ومثال ذلك عندما نفكر في مصادر الطاقة المتجددة للدول الأقل نمواً، علينا أن نتذكر أن أي تكنولوجيا جديدة يجب أن ينظر إليها بلغة جدواها التقنية الحالية وحيويتها الاقتصادية. ويجب أن يؤخذ هذان العاملان بغض النظر عن حالة التطور الاقتصادي في القطر حيثما يجري استخدام التكنولوجيا. وكم هي جدوى تكنولوجيات الطاقة المتجددة وهل هي قابلة للتطبيق؟ وما يمكن برهانه هو أن تكنولوجيات من هذا النوع مجدية وقابلة للتطبيق في الوقت ذاته إلا أنها غير موجودة. لذا ادعى البعض أن تبني الطاقات المتجددة على أنها ملائمة للأقطار الأقل نمواً، أمر خارج نطاق البحث على المدى القريب (في مراجع الفصل الخامس Cassedy and Meier, 1987). ولدى الأقطار الأقل نمواً خيار في تبني تكنولوجيات مستدامة ربما تبطئ تطورها أو الاستثمار إلى حد ما في منشآت القدرة التي تستخدم الوقود الأحفوري وبقية التكنولوجيات التقليدية لدفع عجلة التطور إلى أمام.

قضايا عبر الأجيال

هناك قضايا أخلاقية تكمن وراء العديد من النقاشات حول الطاقات البديلة. فلدى دعاة المسلك الصعب كما لدى دعاة المسلك اللين افتراضات صريحة وكذلك ضمنية لما هو عادل ومُنْصف. وبإمكان صنّاع السياسة أن يزِنوا المنافع النسبية من تمويل مشروع ما مقارنة بآخر، أو أحد أنواع التكنولوجيا مقارنة بنوع آخر، أو حتى التطوير التكنولوجي ذاته مقابل الاستخدامات البديلة للموارد المالية الشحيحة. وقد يساعد الأفراد ضمن المجتمع بواسطة أصواتهم الانتخابية واختياراتهم الشخصية في توجيه هذه السياسات. فالخيارات أخلاقية قدر ما هي تقنية.

ومن الواضح قبل كل شيء أن خياراتنا اليوم عن بدائل الطاقة لها مترتبات مستقبلية

بعيدة تؤثر في مصالح ورفاه الأجيال القادمة. وإذا ما استثمرنا في أحد الخيارات بدل الآخر سيكون الاختيار عطية للأجيال القادمة عليهم إما تقبلها أو إزالتها وقد لا نعرف الآن كلفة كِلا المسلكين.... وإذا ما اخترنا عدم الاستثمار في أي من الخيارات الموجودة فذلك أيضاً سيصبح واقعاً في المستقبل. ولا توجد اليوم أي التزامات بالنسبة إلى تكنولوجيات الطاقة معزولة وحدها. وقد نترك المستقبل بموارد مؤمنة أو من دون ذلك، وبموارد زهيدة الثمن أو مرتفعة، وبمشاكل جانبية متنامية أو مشاكل متضاءلة، وبحل دائمي لحاجتنا إلى الطاقة أو بحاجة أكبر فقط إلى إيجاد حل.

ستكون القضية أسهل إذا ماعرفنا بصورة أكيدة أن أحد المصادر المتوفرة كان مجدياً وقابلاً للاستخدام بصورة واسعة ـ وهو ما يدعى أحياناً بتكنولوجيا القيمة الدنيا الثابتة (Backstop Technology)– لكي نطوره الآن ونتركه للأجيال القادمة (Nordhaus, 1979). وهناك آمال أن أياً من الاندماج النووي أو الطاقة الشمسية سيوفِّر تلك القيمة الدنيا الثابتة. غير أن ذلك ما لا نستطيع أن نَعِدَ به الآن أو عمّا قريب.

هذا ما يترك المجتمع المعاصر في مأزق. فبإمكاننا تبني وجهة نظر التوسعيين – وهي أن قيمة ثابتة دنيا ستُكتشف، أو على الأقل اعتماد حلول مؤقتة ستأخذنا وستأخذ أحفادنا بعيداً في المستقبل. ويجب أن تُوجه السياسة في الوقت ذاته إلى استغلال الموارد للصالح الحالي. فمن الصحيح أن مردود الاستثمار في البدائل مشكوك فيه، لكن القرار بعدم الاستثمار أمر خاضع للشك كذلك. فالاستثمار ربما يفشل وقد تواجهه صعوبات، لكن افتراض عدم وجود حاجة إلى الاستثمار، قد يكون خاطئاً. وفي هذه الحالة ستدفع أجيال المستقبل الثمن – وبسبب عدم مساهمتها في القرار فقد يكون ذلك القرار مخطوءاً وكذلك غير منصف.

أما التحديديون فهم من الناحية الأخرى يرون الكارثة البيئية و/ أو الاجتماعية قادمة بسبب استنزاف الموارد. وعلينا من هذا المنظور أن نسعى الآن من أجل مجموعة من البدائل. ولأن قيمة ثابتة دنيا أو أي شيء مقارب لها ليس إلا مجرد احتمال على أحسن الأحوال، علينا أيضاً تخفيض استهلاكنا لمصادر الطاقة. وربما يبدو ذلك مفضل أخلاقياً في النهاية لكنه يهدف إلى حماية العالم من خطر محتمل. أما إذا كنا مخطئين فقد يكون الخيار مع ذلك غير عادل. وربما نكون السبب في تخفيض

لا داعي له في النمو الاقتصادي الآن، ويؤثر في من هم في أمسّ الحاجة إليه. وبذلك نقوم في الحقيقة بتوريث الأجيال القادمة عالماً أفقر.

وقد قامت وكالات حكومة الولايات المتحدة كما لاحظنا في الفصل الثامن بتبني قاعدة العدل بين الأجيال لبعض السياسات. فوكالة حماية البيئة مثلاً قد ثبتت أن الأجيال القادمة يجب أن لا تتحمل مخاطر أكبر من تلك المخاطر المقبولة في الجيل الحالي. ورغم أن تقبل الخطر بلغة السياسة الحالية أمر غير واضح إلا أن المخاطر واضحة في حالة النفايات النووية. لكن ماذا عن مصادر الطاقة البديلة؟ إننا نجازف بالفشل، غير أن الحصيلة غير معلومة. ونجازف بموارد مالية، غير أن الحصيلة غير معروفة. ونجازف بنتائج جانبية، غير أن الحصيلة غير معروفة. إنما نجازف أيضاً، إذا لم نفعل أي شي.

ربما نحتاج إلى تحسين توجهات سياستنا. من غير المتوقع أن يبدو أي معيار حاسماً، وذلك بسبب عدم إمكانية التخلص من الشك في منظورالبدائل. وسينتهي القرار حول كيفية تطوير تكنولوجيات الطاقة البديلة وضرورة ذلك إلى اجتهاد من قِبَل المجتمع حول إذا ما كان الوعد والأمل يستحقان الاستثمار – لنا اليوم ولمن سيخلفوننا.

المراجع

Basalla, G. *The Evolution of Technology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.

Bhatia, R. and A. Pereira (eds.). *Socioeconomic Aspects of Renewable Energy Technologies*. New York: Praeger, 1988.

Bury, J. B. *The Idea of Progress*. London: Macmillan, 1932. (reprinted in 1955 by Dover, New York).

Camilleri, J. A. 1984. *The State and Nuclear Power*. Seattle: University of Washington Press, 1984.

Cassedy, E. S. and P. Z. Grossman. *«New Technologies - Promise and Uncertainty.»* International Symposium on Energy Options for The Year 2000: Wilmington, September 1988.

Cohen, I. B. *Revolution in Science*. Cambridge: Harvard University Press, 1985.

Florman, S. C. «Small is Dubious.» *Harper's Magazine*: August 1977.

A Forum on Solar Access. Proceedings of a Forum on Solar Access held by the New York State Legislative Commission on Energy Systems, The National Solar Heating and Cooling Information Center, Rockville, MD. July 28. 1977.

Girifalco, L. A. *Dynamics of Technological Change*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

Hayes, D. Energy: *The Solar Prospect*. Washington, DC: The World Watch Institute, 1977.

(Worldwatch Paper No. 11)

Kranzberg, M. and C. W. Pursell (eds.). *Technology in Western Civilization*. New York: Oxford University Press, 1967. Vol. 2: Technology in the Twentieth Century.

Linstone, H. A. and D. Sahal. *Technological Substitution: Forecasting Techniques and Applications*. New York: Elsevier, 1976.

Lovins, A. B. *Soft Energy Paths: Toward a Durable Peace*. Cambridge, MA: Ballinger, 1977.

Mansfield, E. *The Economics of Technological Change*. New York: Norton, 1968.

McKibben, B. «Not So Fast.» *The New York Times Magazine*: 23 July 1995.

Nordhaus, W. D. *The Efficient Use of Energy Resources*. New Haven: Yale University Press, 1979.

Partridge, E. (ed.). *Responsibilities to Future Generations*. Buffalo: Prometheus, 1981.

Repetto, R. *World enough and Time-Successful Strategies for Resource Management*. New Haven: Yale University Press, 1986.

Rogers, E. M. and F. F. Shoemaker. *Communication of Innovation: A Cross-Cultural Approach*. Second Edition. New York: The Free Press, 1971.

Sarewitz, D. *Frontiers of Illusion-Science, Technology, and the Politics of Progress*. Philadelphia, PA: Temple University Press, 1996.

Schumacher, E. M. *Small is Beautiful*. New York: Harper, 1973.

Teich, A. H. [et al.]. *Science and Technology Policy Yearbook*. Washington, D. C: American Association for the Advancement of Science, 1994.

Tornatsky, L. G. and M. Fleischer. *The Processes of Technological Change*. Lexington, MA: Lexington Books, 1990.

Winner, L. *The Whale and the Reactor*. Chicago: University of Chicago Press, 1986.

الفصل الحادي عشر
نماذج التكنولوجيات الجديدة

بحثنا في الفصل العاشر العوائق العامة في سبيل تبني التكنولوجيات الجديدة. وسنركز هنا على قضايا خاصة تتعلق بثلاثة أنواع من التكنولوجيا البديلة ـ الشمسية ـ الحرارية والوقود الاصطناعي من الكتلة الحيوية والاندماج النووي وكل واحد منها ينتمي إلى مقياس زمني مختلف عما تم بحثه في الفصل السابق. إن تطبيق المميزات وخاصة المميزات التقنية مكمل ضروري للنقاط العامة التي أثرناها في ما سبق. ولن نستطيع تفهم الابتكارات التكنولوجية المستقبلية في مجال الطاقة أو الحكم عليها من دون امتلاك معرفة في كِلا المجالين.

الطاقة الشمسية ـ الحرارية

نعني بالتكنولوجيا الشمسية ـ الحرارية أي طريقة لتجميع الحرارة من أشعة الشمس وايجاد استخدام مفيد لتلك الطاقة الحرارية. ويمكن لهذه الاستخدامات أن تشمل تدفئة الفضاءات الداخلية للبيوت والبنايات وتسخين الماء للاستخدام المنزلي وتوفير الحرارة للمعالجات الصناعية أو البخار لتوليد الكهرباء. ورغم وضع التكنولوجيا الشمسية ـ الحرارية ضمن تكنولوجيات المقياس الزمني القريب للتبني، إلا أن هذه التكنولوجيا لم تختبر بصورة جيدة تقنياً لاستخدامات مثل التسخين الصناعي على مدى واسع أو توليد الكهرباء، لذا يمكن أن توضع في صنف المدى ـ المتوسط.

ولكي تكون الطاقة الشمسية نافعة يجب أن تُجمع وإن أبسط نوع من مجمِّعات هذه الطاقة هو نافذة تواجه الشمس في يوم خالٍ من الغيوم. وهذه على أي حال ليست تكنولوجيا طاقة شمسية لأن النوافذ العادية ليست مصممة لتجميع القدر الأكبر من

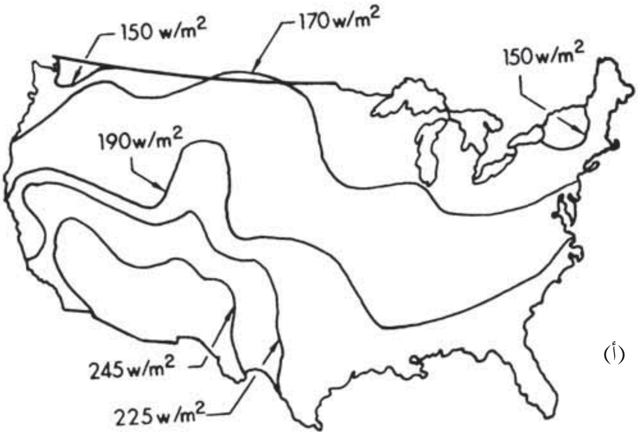
الحرارة أو حفظها أو استخدامها لأنها مصدر أساسي للإنارة. ويمكن لتصميم النافذة وموقعها أن يكونا جزءاً من التكنولوجيا الشمسية الحرارية. وقد طُوّر التصميم المعماري في السنين الأخيرة لتعزيز جمع وتخزين الحرارة الشمسية بصورة صرفة من خلال الهيكل الأساسي ومكونات البناء (الجدران والنوافذ وما إلى ذلك). وتصنف هذه الأبنية ضمن التكنولوجيا الشمسية السكونية لأنها تعمل أساساً من دون أي أجزاء متحركة أو وسائل تحكم.

والتصاميم الأخرى المدعوة بالأساليب الفاعلة تحاول الإمساك بقدر أكبر من الطاقة الشمسية المتوافرة واستخدامها من خلال أجزاء متحركة وتحكم. والشيء الأهم أن كل الأنظمة الناشطة لها وسط تبريد دوّار. وهذا المبرد (الذي يؤدي نفس دور المبرد في محطة قدرة حرارية، انظر الفصل الثالث) ينقل الطاقة الحرارية من المجمِّع إلى نقطة استخدامها. ويحتاج مثل هذا النظام للتدوير إلى مصدر قدرة منفصل (عادة ما يكون كهربائياً) وأيضاً إلى أدوات قياس لاستقصاء حالته والتحكم بعمله.

لقد جرى البرهان على أن التكنولوجيا الشمسية ـ الحرارية ملائمة تقنياً وأن الأنظمة السكونية وكذلك الفاعلة منها لتسخين الماء منزلياً أنتجت على نطاق واسع وأنها متوافرة تجارياً. غير أن التكنولوجيا الشمسية الحرارية وخاصة الأنظمة الشمسية الفاعلة كان لها حيوية اقتصادية محدودة فقط. وربما لن يكون من المجدي من حيث الكلفة استخدام التكنولوجيا الشمسية الحرارية في أي موقع معين الآن. وأحد أهم الاعتبارات في تحديد الجدوى الاقتصادية للطاقة الشمسية الحرارية هو بالطبع شدة وتذبذب الطاقة الشمسية الساقطة في موقع البناء المطلوب. وهذا يبدأ بالبناية المحددة وفي محيطها المباشر. وقد تقلص العوارض المحلية قي بعض الحالات ضوء الشمس الساقط وفي أوقات مختلفة من النهار خلال العام كلها أو في فصول معينة. وإذا ما وجدت مثل هذه العوارض فستكون عادة بنايات أخرى أو أشجار وتمثل مشكلة للوصول إلى الشمس إذا ما كانت على ملك الجار (انظر الفصل العاشر).

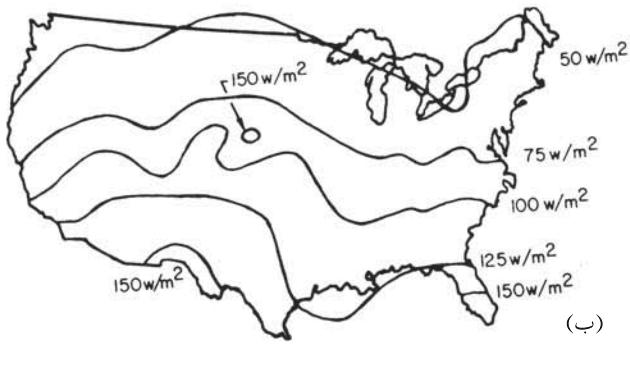
يعتمد تَوَفّر الطاقة الشمسية الساقطة على دراسة إقليمية أيضاً. وتحدد درجة عرض الموقع مثلاً الزوايا الموسمية للشمس فوق الأفق وعدد ساعات ضوء الشمس في كل

يوم. من ناحية ثانية الحالة المناخية في المنطقة أمر بذات الأهمية وخاصة مقدار التغطية بالغيوم. وتظهر في الشكل 11-1 خريطة كونتورية لمعدل كثافة الفيض الشمسي[1] عبر الولايات المتحدة للعام بكاملها وأيضاً لشهر كانون الأول/ ديسيمبر فقط. وإذا ما تفحصنا خطاً من الشرق إلى الغرب عبر البحيرات العظمى (الشكل 11-1) فسنلاحظ وجود اختلافات في معدل الفيض حتى في ذات خط العرض.



(أ)

(أ) ـ المعدل السنوي لكثافة الفيض الشمسي بالواط/ متر مربع وتمثل الأرقام معدل القيم القابلة للاستخدام التي تصل سطح الأرض في 24 ساعة.



(ب)

(ب) ـ المعدل لشهر كانون الأول/ ديسمبر لكثافة الفيض الشمسي بالواط/ متر مربع وتمثل الأرقام معدل القيم القابلة للاستخدام التي تصل إلى الأرض في 24 ساعة.

الشكل 11-1: معدل كثافة الفيض الشمسي للولايات المتحدة

المصدر: F. Bennett, «Monthly Mass of Mean Daily Insolation for the United States», *Solar Energy*, Vol. 9, Pergamon Press, 1969.

---

1 ـ الفيض الشمسي الذي يدعى أحياناً (insolation) أو كثافة الطاقة الشمسية الحرارية الساقطة في اليوم الواحد في وحدة المساحة وهي في وحدات نظام MKS (انظر الملحق أ) يقاس بالواط/ متر مربع. أما في النظام الإنجليزي فهو وحدة حرارية بريطانية/ القدم المربع في الساعة حيث إن وحدة حرارية بريطانية/ ساعة هي وحدة القدرة (سرعة انتقال الطاقة الحرارية) بدل الواط (انظر الملحق أ).

وسبب هذا بالطبع يعود إلى اختلاف الأنماط المناخية. فالغطاء من السحب وكمية المطر أكثر بكثير شرق البحيرات العظمى مقارنة بغربها. علاوة على ذلك يقلل غطاء السحب الفيض الشمسي السنوي في الشمال الغربي على ساحل الباسيفيكي وفي خط العرض نفسه.

ولا يقتصر تأثير المناخ في معدل الأداء السنوي الشمسي، بل يؤثر أيضاً في فترات انقطاع الشمس وبذلك تتبين أهمية خزن الطاقة النسبية (انظر الملحق ج). ومن المهم إدراك أن أي معدل لقيمة الأداء السنوي أو الشهري للشمس يتضمن الاختلافات اليومية عبر 24 ساعة من الليل والنهار. وسيحجب المعدل السنوي أيضاً التباينات التي تحدث في ضوء الشمس من يوم إلى يوم والتي تحدث فصلياً كذلك (انظر الشكل 11-1 ب الذي يبين المعدل الأوطأ لفصل الشتاء).

وتتبين أهمية الاختلافات في الفيض الشمسي الساقط تقنياً واقتصادياً لأنها تحدد ما هو مطلوب لتوفير الطاقة بصورة مستمرة للمستخدمين. وتشمل الأنظمة الشمسية الفاعلة خاصيتين لضمان استمرارية التجهيز: خزن الطاقة ومصدر داعم. وتخزن أنظمة الخزن الشمسية الحرارية الحرارة عادة بشكل ماء ساخن. ورغم أن خزن الماء الساخن يمثل مفهوماً بسيطاً إلا أن كلفة الاستثمار تتزايد بسرعة مع زيادة سعة الخزن، والسبب الرئيسي هو أن حجم مجمّع الطاقة يجب أن يزيد أيضاً ليستفيد من ذلك. وستكون محاولة خزن ما يزيد على تجهيز يومين من الطاقة مكلفةً إلى حد يمنع استخدامها.

أما مصدر الدعم فهو مصدر حراري تقليدي وحسب ـ مرجل يستخدم الوقود الأحفوري مثلاً ـ يتولى تزويد الطلب عند عدم وجود طاقة شمسية ساقطة كافية أو عدم توفر طاقة مختزنة. وتحدد الجدوى الاقتصادية للنظام الشمسي بكمية الوقود التقليدي الذي يجري توفيره. وستزداد الجدوى الاقتصادية للنظام كلما قل الاحتياج لتشغيل نظام الدعم. أو نستطيع القول بطريقة أكثر دقة أن الجدوى يقررها الفرق على الأقل جزئياً بين الكلفة الاستثمارية في النظام الشمسي ـ الحراري وبين كلفة الوقود في نظام الدعم.

وبإمكاننا الحصول على تقدير أفضل لاقتصاديات النظام الشمسي الحراري من

احتساب قيمة الطاقة الشمسية بالدولار باستخدام المعلومات عن الفيض الشمسي في الشكل 11-1. ويجب أساسياً أن نفكر بمقدار الطاقة التي يمكن أن نقتنصها بواسطة مجمّع عند استخدام معدل محدد للفيض السنوي في منطقة معينة. وسيعبّر عن النتيجة بوحدة الطاقة في وحدة المساحة التي تسقط عليها الطاقة الشمسية.

وعادة يعبر عن مقدار الطاقة إما بالوحدات المترية أي بالواط لكل متر مربع من المساحة أو بالوحدات الحرارية البريطانية في الساعة في القدم المربع وتستخدم الوحدات الحرارية البريطانية BTUs في الساعة في القدم المربع هنا ونضع الحسابات على أساس سنوي. ومعامل التحويل الناتج[2] هو $2.75x10^{-3}$ مليون وحدة حرارية بريطانية/ قدم ^{2} – الساعة لكل واط/ متر ^{2} ($MBTU/ft^2$ - yr per W/m^2) وهذا ما سيحول كثافة معدل فيض سنوي مستوى قدره 100 واط/ متر ^{2} إلى 0.275 مليون وحدة حرارية بريطانية/ قدم ^{2} - سنة (أي 0.275 مليون وحدة حرارية بريطانية في كل قدم مربع في السنة). ويجب أن يقارن هذا المقدار من الطاقة الشمسيّة (بافتراض أن النظام ذو كفاءة تبلغ 100 في المئة) مع كلفة متطلبات التدفئة نفسها باستخدام وقود أحفوري مثل النفط. وتبلغ كلفة وقود التدفئة إذا كان سعر الغالون 1 دولار، نحو 7.25 دولار لمليون وحدة حرارية بريطانية. وهكذا إذا ما استبدل النفط بالطاقة الشمسية سيبلغ مقدار كلفة التوفير للقدم المربع الواحد من المجمّع الذي يمتص هذا القدر من الطاقة:

7.25x0.275 = 2.00 دولار لكل 0.275 مليون وحدة حرارية بريطانية/ قدم ^{2} - سنوياً.

ثم يجب علينا أن تأخذ بالاعتبار الكلفة الاستثمارية الأولية للمجمع الشمسي والمعدات المصاحبة مثل الخزن والمضخات والتحكم. وتشير تجربة الصناعة الشمسية والمشاريع الريادية في أوائل الثمانينيات إلى استثمار يتراوح بين 50 و100 دولار لكل قدم مربع من المجمع. وإذا ما افترضنا هذه الكلف للنظام فسيحتاج الأمر 25 إلى 50 عام ليوفِّر المستخدم ما فيه الكفاية ليدفع كلفة النظام الشمسي (من دون احتساب أي نسبة فائدة) ولن تكون هذه فرصة استثمارية جيدة حتى إذا افترضنا كفاءة المجمع 100 في المئة وكانت نسبة الفائدة صفر في المئة. ويجب أن نخفض كلفة المعدات بصورة كبيرة جداً ليكون أي نظام عملي جاذباً للمستخدم المهتم بالكلفة.

2 ـ وذلك باستخدام 1 واط = 3.41 وحدة حرارية بريطانية/ الساعة،وتتألف السنة من (24 x 365) = 8760 ساعة، وأن المتر المربع = 10.85 قدم مربع، وأن 3.29^2 = 10.85 قدم مربع/ المتر المربع، و 10^6 BTU = mBTU .

هذا المثال يجعل الطاقة الشمسية ـ الحرارية تبدو غير اقتصادية ـ غير أن اقتصاديات الطاقة الشمسية في الحقيقة ستتحسن بقدر كبير عندما نفكر بمناطق محددة. والمنطقة الأكثر تعرضاً للشمس في الولايات المتحدة هي الجنوب الغربي (انظر إلى الخط الكونتوري 245 واط/ المتر المربع في الشكل 11-1 (أ)) وهي منطقة الحزام الشمسي حيث يتوقع المرء قدراً كبيراً من الأشعة الشمسية. ودرجة حرارة منطقة الحزام الشمسي العالية تحسن أيضاً كفاءة المجمعات*. وتحصل أنواع معينة من المجمعات الشمسية على معدل أداء سنوي في تلك المنطقة يصل إلى حوالى 200 واط/ المتر المربع أو إلى ما يزيد على 0.5 مليون وحدة حرارية بريطانية/ القدم المربع ـ السنة. وهذا سيحسن المردود بعامل يبلغ تقريباً اثنين على مثال 100 واط/ متر مربع ـ أي مدة استرداد تترواح بين 12.5 و25 عام مع نسبة فائدة على القرض مقدارها صفر. وإذا ما أضيف إلى هذا أسعار أعلى للوقود التقليدي وحوافز الولاية والحكومة الاتحادية بهيئة سماحات ضريبية (والتي عرضت في نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات لكنها أوقفت بعد ذلك) فسيتقلص مدى الاسترداد إلى حيث تصبح الطاقة الشمسية – الحرارية مجدية اقتصادياً مقارنة بمصادر الوقود التقليدي.

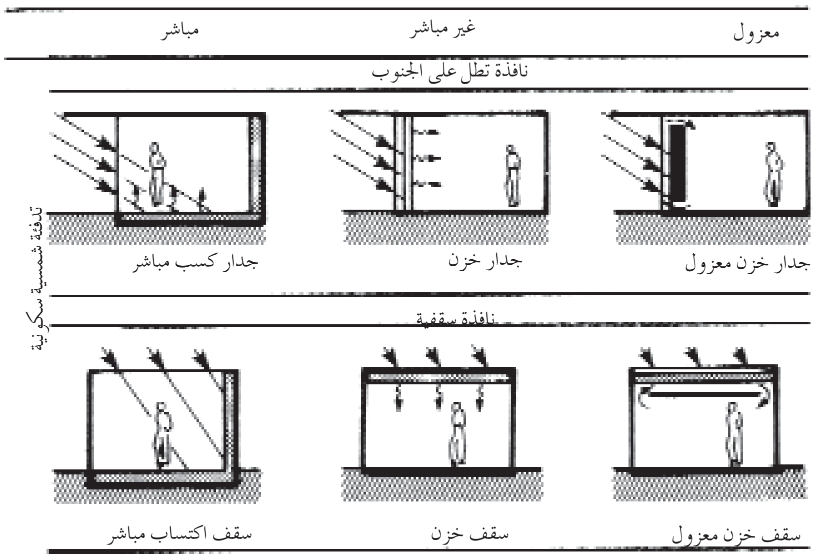
الأنظمة الشمسية ـ الحرارية السكونية (أو السلبية)

المفهوم الأساسي وراء تصميم الأنظمة الشمسية السكونية هو امتصاص الحرارة الشمسية في البناية حينما تشرق الشمس وتحتفظ بالحرارة عندما لا تكون الشمس مشرقة. ويتم ذلك من خلال السماح لأكبر قدر من نفاذ أشعة الشمس المباشرة في البناية وامتصاصها بطريقة ما داخلها ومن ثم تقليل فقدان الحرارة من معاملات التوصيل الحمل والإشعاع.

ونتمكن من الحصول على فكرة عن كيفية عمل تصاميم الأنظمة الشمسية السكونية من الشكل 11-2. لاحظ في الشكل أن ضوء الشمس يسخن الغرفة مباشرة من خلال النوافذ وأن الحرارة تحفظ في الجدران والسقوف. وتدفئ هذه الحرارة الهواء المجاور الذي يدور خلال الفضاء. ويمكن لتقنية الجدران غير المباشرة والمعزولة المبنية في الشكل أن تعزز تأثيرات الخزن.

* في مناطق مثل أريزونا في الولايات المتحدة حيث يشابه المناخ البلاد العربية سوف لا تكون هناك إلا حاجة قليلة للاستفادة من الطاقة الشمسية بتحويلها إلى حرارة عبر بضعة أشهر في السنة، لذا فإن احتساب كفاءة الاستخدام يجب أن تخضع لحسابات أكثر تفصيلاً عبر أشهر السنة المختلفة أو لاستخدام الطاقة الشمسية لغرض التكييف الصيفي أضافة إلى التدفئة.

ويمنع تعرض الحرارة للفقدان السريع من خلال استخدام بعض التكنولوجيات السكونية الأخرى، فبعض النوافذ مثلاً لها طلاء داخلي بمواد مثل أكسيد الزنك الذي يسمح لضوء الشمس بالدخول لكنه يعكس الأشعة تحت الحمراء مانعاً إياها من التسرب. وسيحقق نظام شمسي سكوني في الحقيقة تدفئة للغرف حتى بعد أن تتوقف الشمس عن السطوع على البناية. ويساهم المعماريون في تكييف الوجهة الجنوبية للبناية والنوافذ العليا لتعزيز اقتناص ضوء الشمس. وسيقللون في الوقت ذاته من فقدان الحرارة بعزل الجدران المواجهة شمالاً بصورة بشدة وإبقاء مناطق قليلة تواجه بشدة إن وجدت.



الشكل 11-2: التدفئة الشمسية السكونية (السلبية)

المصدر: U.S. Dept. of Energy (1981)

الأنظمة الشمسية ـ الحرارية الفاعلة

تعمل الأنظمة الشمسية الفاعلة عموماً كما لاحظنا مع المجمعات ووسط تبريد مدوَّر ينقل الحرارة من نقطة التجميع إلى نقطة الاستخدام. ويبين الشكل 11-3 أشكال تخطيطية لنظامين فاعلين يعملان بالطريقة نفسها ويستخدمان نوعين مختلفين من أوساط التبريد. يمثل الشكل الأعلى نظام ماء ساخن يستخدم سائلاً للتبريد. وسائل

التبريد هو إما الماء أو محلول مضاد للانجماد[3] يجري تسخينه في المجمع الحراري ثم يتدفق إلى صهريج خزن الماء الساخن حيث يدور خلال مبادل حراري منفصل (غير مبين في الشكل) غاطس في منظومة الماء الساخن للبيت غير أنه لا يختلط به. وهكذا يكون الماء في الصهريج مهيئاً للاستخدام في البناية في حين يدور السائل المبرد عائداً إلى مجمّع الحرارة. ويبدو في الشكل الأسفل نظام هواء ساخن. ويجري تسخين الهواء في المجمع، ثم يدوّر إما إلى مجاري هواء مباشرة لتدفئة الغرف أو إلى طبقة من الحصى لخزن الحرارة[4].

ويجري تدوير المادة المبردة في كلا النظامين بواسطة مضخة أو دافعة. ويمكن لكِلا النظامين خزن الحرارة الشمسية المجمعة وكلاهما فيه نظام تسخين ثانوي (مصدر دعم) ليعمل في غياب الحرارة الشمسية المباشرة أو المخزونة. والشي الأهم أن كلا النظامين يحتاج إلى التحكم لكي يعمل بصورة جيدة. فالوسط المبرد يجب أن يقتصر جريانه من المجمع فقط عندما تكون درجة حرارته عالية بما فيه الكفاية ليتبادل الحرارة في صهريج الخزن (إذا ما دوّر وسط التبريد وهو بدرجة حرارة منخفضة فسيأخذ الحرارة في الواقع من وحدة الخزن). وتصح الاعتبارات نفسها على تدوير الماء أو الهواء من وحدة الخزن إلى نقطة الاستخدام. وعندما تكون درجة حرارة الخزن واطئة جداً (أي إن كل الحرارة التي فيه قد استنفدت) سيفتح مجرى جانبي ليرسل وسط التبريد مباشرة إلى مسخن الدعم الثانوي.

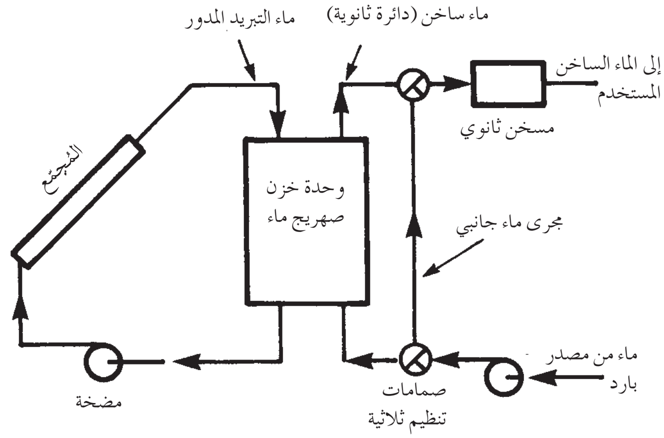
وتعمل صمامات التنظيم الثلاثية المبينة في الشكل بناءً على أوامر نظام التحكم لتأمين هذا الجريان. فمثلاً إذا كان الماء من صهريج الخزن سيسخن رغم أنه ساخن بما فيه الكفاية، فإن الصمام الأسفل يسمح لتدفق الماء أن يجري في أسفل الصهريج كما يسمح الصمام العلوي بالجريان منه إلى موقع استخدامه. وإذا هبطت درجة حرارة الصهريج من ناحية المجرى، فإن الصمام الأسفل سيحرف الجريان عبر مجرى

---

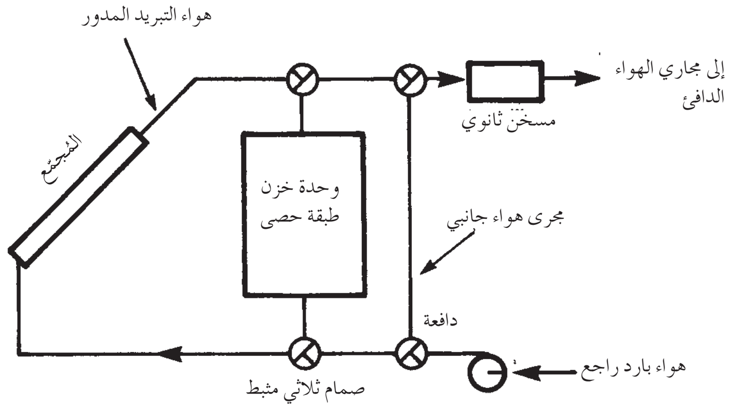
3 ـ يستخدم مانع التجمد حيث يمكن أن يتجمد السائل في ليلة واحدة في المناخ السائد. ويكون سائل التبريد في دورة منفصلة معزولاً عن الماء الساخن الذي سيستخدم. ويجري نقل الحرارة من سائل التبريد إلى الماء الساخن عبر مبادل حراري كما يحدث في محطة قوة كهربائية.

4 ـ يمكن خزن الحرارة من الهواء الذي يسخن في المجتمع بإمراره على طبقة من الحصى لتسخينه. ويمكن استغلال الحرارة بتمرير هواء بارد (من الفضاء المطلوب تدفئته) خلال طبقة الحصى (انظر الملحق ج عن خزن الطاقة).

الماء الجانبي وبذلك يتجنب الصهريج ليمر خلال المسخن الثانوي الداعم إلى نقطة استخدامه. وتعمل صمامات تنظيم الهواء الثلاثية على منظومة الهوء الساخن بالطريقة نفسها.



(أ)

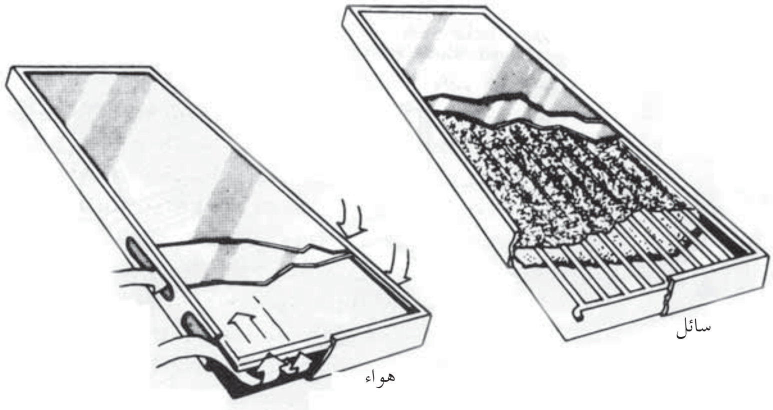


(ب)

الشكل 11-3: أنظمة شمسية – حرارية فاعلة.
(أ) نظام ماء ساخن منزلي. (ب) نظام منزلي للتدفئة بالهواء الساخن
المصدر: U.S. Dept. of Energy (1981)

تكنولوجيا المجمّع

هناك بضعة أنواع من المجمعات الشمسية الفاعلة. فبعضها يركز أشعة الشمس في حين تقوم الأخرى ببساطة بامتصاص الإشعاع الساقط على ألواح مسطحة. وسنبحث في خمسة أنواع.



الشكل 11-4 المجمّعات الشمسية المسطحة

المصدر: *Energy Primer: Solar, Water, Wind, and Biofuels*. Updated and Revised Edition, Edited by Richard Merrill and by Thomas Gage, Copyright 1978 by Portola Institute. Reprinted by Permission of Dell Publishing, a division of Bantam, Doubleday, Dell Publishing. Group Inc.

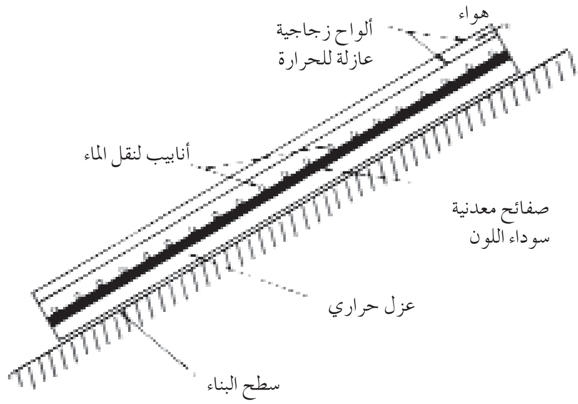
وفي المجمعات المسطحة يقع الإشعاع الشمسي على المسطح الماصّ من صفيحة معدنية سوداء اللون في تماس مباشر مع المبرِّد لتسهيل نقل الحرارة. وفي مجمع هوائي لنقل الحرارة من النوع المبين في الشكل 11-4 إلى اليسار هناك صندوق بسيط بشكل مستطيل. ويتألف أحد جانبي الصندوق من زجاج مزدوج السماكة يسمح للشمس بتسخين الجانب الآخر من الصندوق – وهو صفيحة مستوية سوّداء (صفيحة المجمّع). ويعمل الزجاج المزدوج في الوقت ذاته كعازل يمنع الحرارة من الهروب. أما المبرِّد وهو الهواء فيتدفق بين الزجاج وسطح الصفيحة ناقلاً الحرارة من سطحها إلى المنظومة. أما في المجمع ذو الصفيحة المستوية المبرَّد بالسائل (الشكل 11-4 إلى اليمين والشكل 11-5) فيمر المبرِّد خلال سلسلة من الأنابيب الصغيرة تكون كلها بتماس مع السطح الذي تسخنه الشمس لنقل الحرارة إلى المنظومة. ويجري تنظيم سرعة جريان المبرِّد للحفاظ على درجة حرارة ثابتة. بخلاف ذلك ستستمر درجة الحرارة بالارتفاع حتى يغلي المبرِّد أو أن تصاب بنية المجمع نتيجة الإجهادات الحرارية. ويمكن لمجمّعات الصفائح المسطحة أن تمتص الحرارة من ضوء الشمس المنتشر في يوم غائم، رغم أنها تعمل بصورة أفضل طبعاً في الأيام المشمسة.

وقد استخدمت الأنظمة الشمسية التجارية في أغلب أنواعها تكنولوجيا الصفائح المسطحة. وهذا صحيح خاصة في حالة الأنظمة الشمسية المنزلية. غير أن نوعين من المجمعات المركزة قد قاربا نقطة إطلاقهما تجارياً كذلك أو على الأقل لاستخدامات محدودة. والمجمعات المركزة ليست متعددة الاستخدامات في ظروف مختلفة أسوة بالمجمعات المسطحة لأنها لا تعمل في ضوء الشمس المنتشر. فهي تركز أشعة الشمس المباشرة فقط عندما يكون المجمع موجهاً نحو الشمس. غير أن هذه المجمعات تعمل في يوم مشمس بكفاءة عالية وتمتلك في أنواع معينة من المناخ معدلات سنوية لجمع الحرارة أعلى بكثير من مثيلاتها للمجمعات المسطحة ذات المساحة المكافئة.

ويمكن للمجمعات المركزة العمل في درجات حرارة أعلى من المجمعات المسطحة وذلك لوجود سطح مسخن أصغر. وهذا يعني فقدان حرارة أقل بسبب الإشعاع عند درجة حرارة معينة كما إن عملية التركيز تعني تركيز أعلى للفيض الشمسي. وهكذا فبإمكان مجمع يركز على خط (الشكل 11-5) أن يرفع درجة حرارة المبرد ضمن المدى 150^{o} – 550^{o} فهرنهايت فيما تعمل المجمعات المسطحة ضمن المدى 80^{o} – 200^{o} فهرنهايت فقط. ويدور المبرد في مجمع التركيز الخطي خلال أنبوب واحد يوضع موضع خط تركيز العاكس الذي هو عادة أسطوانة على شكل قطع مكافئ (Parabola). والأنبوب له سطح مسوّد في بعض الحالات أو أنه قضيب مكسوّ بمادة ماصة موضوع ضمن أنبوب زجاجي. وفي كلتا الحالتين تسخن أشعة الشمس المركزة المبرِّد في الأنبوب أو القضيب والذي يجري تدويره خلال منظومة من المبادلات الحرارية ووسائل الخزن شبيهة في أسس عملها بمنظومة المجمع المسطح.

وقد أظهرت مجمعات الأنبوب المفرغ (لم تدرج صورتها) بعض بشائر النجاح للاستخدام الواسع. وتجمع هذه النوعية مميزات من المجمع المسطح والمجمع المركِّز. وتتألف أساساً من مصفوفات من الأنابيب الطويلة والتي هي في الحقيقة أنابيب داخل أنابيب. ويحمل الأنبوب الداخلي وسط التبريد بينما يكون الأنبوب الخارجي مفرغاً وبذلك يوفِّر عزلاً لتقليل فقدان الحرارة. وهناك خلف الأنابيب عاكسات مقوسة قليلاً للتركيز البسيط. غير أن مصفوفة مستوية من الأنابيب تستطيع

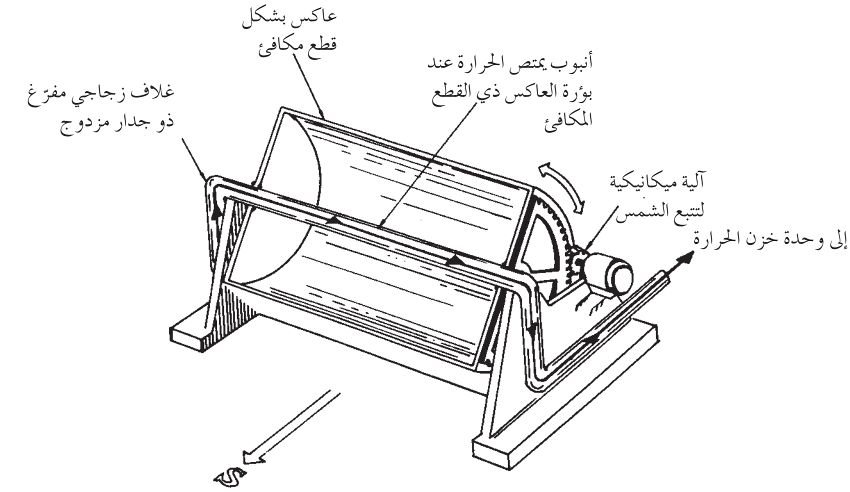
تجميع ما يكفي من الإشعاع بحيث تتمكن مثل مجمع صفيحة مستوية من العمل على الضوء المنتشر مثلما تعمل على ضوء الشمس المباشر. غير أن تصاميم الأنابيب المفرغة مثل مجمعات التركيز الخطِّي بإمكانها أيضاً توليد درجات حرارية عالية – تصل إلى 350° فهرنايت.



الشكل 5-11

مقطع جانبي لمجمّعات شمسية مسطحة للماء الحار

المصدر: Penner/ Icerman, *Energy*: vol 2. Reading, MassachuseHs: Addison- Wesley Publishing Co. Inc, (1975)



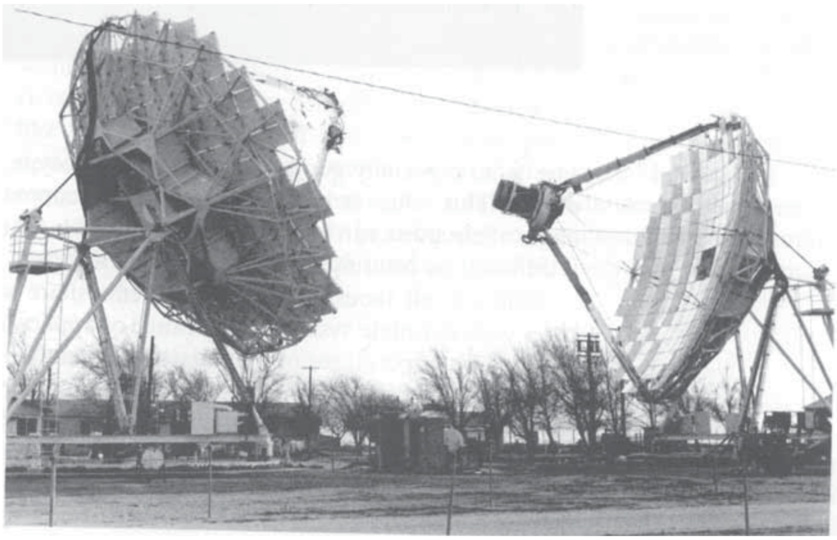
الشكل 6-11

مجمع شمسي يركز على خط (Line - Focus)

المصدر: Morrow (1973)

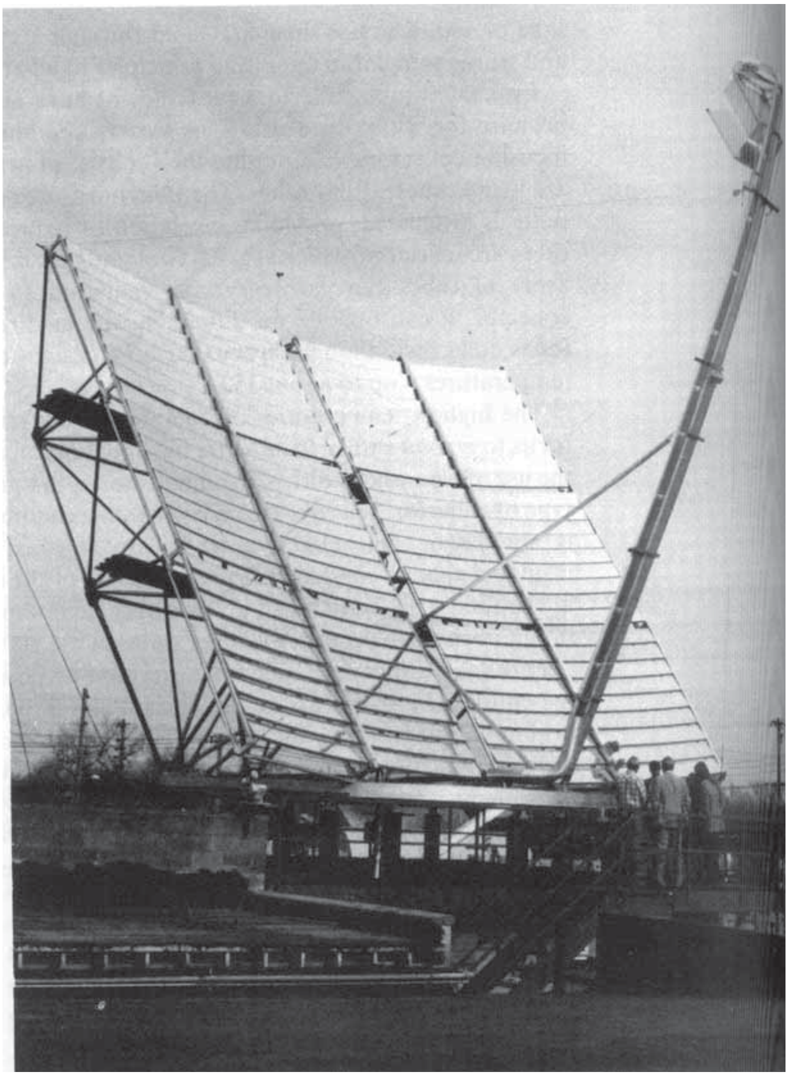
أما أعلى الدرجات الحرارية فتُستحصل من المجمعات التي تركز على نقطة بدل خط. والتركيز على بقعة يُستحصل باستخدام عاكسات مقعرة ذات شكل قطع مكافئ كما تظهر في الشكل 11-7. وتعكس أشعة الشمس في هذا النوع من المجمعات في تجويف يحتوي ملف سائل التبريد. هذا التجويف محجوب لمنع فقدان الحرارة منه بالإشعاع وكذلك بواسطة التوصيل الحراري. ويمكن لهذا النظام أن يوصل درجة الحرارة في البؤرة إلى درجات حرارية عالية أنتجت نماذج للعرض وصلت درجة الحرارة فيها مدى 100° – 1500° فهرنهايت وذلك بسبب كثافة الإشعاع الشمسي في البؤرة.

وقد جرى عرض العاكسات الشمسية بشكل قطع مكافئ في العديد من الأوقات خلال التاريخ (ومنها مثلاً تلك التي عرضت في معرض باريس عام 1878 وكانت عبارة عن وعاء شمسي مقعر فاعل). من ناحية ثانية كانت هذه العاكسات قد بنيت تاريخياً من دون الالتفات إلى الكلفة ونُظِر إليها كأداة علمية أكثر مما هي بديل عملي لتوليد الطاقة. وتركز المشاريع التي تعرض الطاقة الشمسية اليوم على نقيض ذلك على كلفة بناء منخفضة كخاصية أساسية في جدوى المشروع. والمجمّع البؤري الذي يبينه



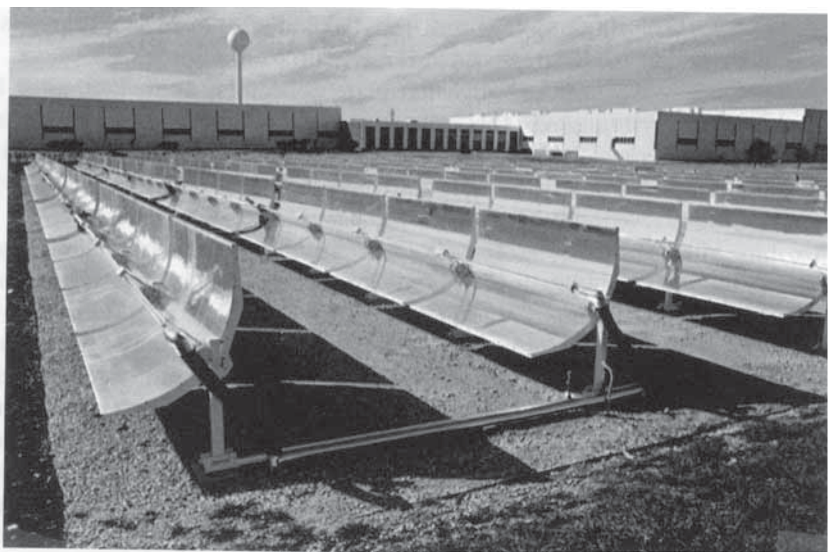
الشكل 11-7: مجمعات شمسية في البؤرة (Point Focus) من نوع القطع المكافئ القرصي.
مصدر الصورة:
Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.

الشكل 11-8 نموذج جيد على وجه التخصيص لتصميم ريادي قليل الكلفة للتركيز في البؤرة. ويتألف هذا العاكس من مجموعة من المرايا الشرائحية المنحنية يمكن التحكم بزاوية ميلها إلى الأعلى والأسفل فيما يجري تعديل الزاوية الأفقية بواسطة دواليب دوارة على سكة دائرية.



الشكل 11-8:
مجمع شمسي من نوع العاكس في البؤرة بتصميم منخفض الكلفة.
مصدر الصورة:.Power Kinetics, Inc., Troy, NewYork

رغم أن كافة أنواع المجمعات المركزة تشارك في بعض تشابهات التشغيل في أنظمة اللوائح المسطحة إلا أن استخدامها أوسع بسبب درجات الحرارة الأعلى في الأنظمة المركزة. وقد جرى عرض لاستخدام المركزات الخطية في توفير الحرارة للعمليات الصناعية وكبديل للمراجل لتشغيل التوربينات البخارية لتوليد الكهرباء. أما أنظمة المجمعات البؤرية فقد استخدمت في مشاريع صناعية مشابهة وتعتبر بسبب درجات الحرارة العالية أكثر كفاءة لمثل هذه المهمات. غير أن استخدامات الأنظمة الشمسية الحرارية على نطاق واسع في الصناعة يحتاج إلى تطوير على نطاق واسع. وقد تحتوي مشاريع مفردة على مئات آلاف الأقدام المربعة من مساحات المجمعات. ومثل هذه الاستخدامات ليست في الحقيقة إلا متوسطة المدى على المقياس الزمني ولم تكتسب الجدوى التقنية الكاملة من حيث كونها مهيأة للإنتاج الكثيف ولنشرها تجارياً على نطاق واسع. وأحد المشاكل الهندسية الأساسية كما لاحظنا في الفصل العاشر هي الإنتاج الكثيف للمجمّعات. ولا يتوقع أن توفِّر هذه المجمعات نسبة ملموسة من متطلبات الطاقة لبقية الفروع الصناعية ما لم يجرِ إنتاجها بصورة كثيفة.



الشكل 11-9: حقل تجميع الطاقة الشمسية للأغراض الصناعية في شركة جونسون وجونسون في شيرمان بتكساس.

المصدر: Solar Engineering (1980)

ويفكر المهندسون في الوقت ذاته بطرق لتصنيع المجمعات بكلف رخيصة بواسطة الإنتاج الكثيف. وأحد المفاهيم لتصنيع المجمعات الخطية هي من خلال بناء عاكسات قطع مكافئ على شكل قنوات (الشكل 11-9) تستخدم تقنيات تصنيع الصفائح المعدنية مثل تلك المستخدمة في الإنتاج الكثيف للأدوات المنزلية. وسيجري في الواقع تشكيل الصفائح بالشكل المطلوب بواسطة مكائن كبيرة لتشكيل المعادن. سيجري بعد ذلك تجميعها مع الأنابيب في البؤرة الخطية باستخدام البرشام أو اللحام. وإحدى مشاكل هذه الفكرة هي أن العاكسات تشبه الأدوات البصرية تقريباً وتحتاج إلى دقة أكبر بكثير مما تتطلب أدوات أخرى تصنع من الصفائح المعدنية بأساليب الإنتاج الكثيف عادة – غير أنه يعتقد أن قدراً قليلاً من التهاون في الأداء سيكون مقبولاً وقد يكون ضرورياً لغرض احتواء الكلفة. وعلى أي حال فإن مثل هذا الجهد للإنتاج الكثيف مازال ينتظر المحاولة.

نحو التبني

لقد وصلت التكنولوجيا الشمسية السكونية المرحلة التجارية وأصبحت أجزاء منها تدرج في تصاميم البناء كل يوم وتبرهن في معظم الأحيان على جدواها الاقتصادية. ورغم ذلك فإنها لا تطلب إلا عندما يوجد اهتمام أكبر بكلفة الطاقة أو بالحفاظ على الموارد في بنايات جديدة وبذلك تطور وتستغل إلى أقصى حدودها. ومع ذلك تبقى هناك حواجز قليلة أخرى في سبيل تبنيها بصورة واسعة.

ورغم أن المجمِعات المسطحة وكذلك بعض المجمِعات المركزة الخطية والمجمعات ذات الأنابيب المفرغة قد جرى عرضها لتكون ذات جدوى تقنية وقد استُغِل بعضها تجارياً إلا أنها غير قريبة من الاستخدام الواسع لأي تطبيق رئيس. والحاجز الرئيس كما أشرنا هو اقتصادي. وسوف يكون الاستغلال التجاري محدوداً إلى حين تكون كلفة التكنولوجيا الشمسية ـ الحرارية تنافسية مع مصادر الطاقة التقليدية. غير أن الطاقة الشمسية ـ الحرارية قد تزيد من تغلغلها في السوق بصورة ملموسة إذا ارتفعت أسعار النفط والغاز بصورة كبيرة وأعادت الحكومة المحفزات الضريبية وهبطت أسعار الأنظمة الشمسية أو بتوافق هذه العوامل. ونستطيع في الحقيقة أن نتوقع عند نقطة معينة ازدياد أسعار الوقود التقليدي، وأن حدثاً مثل هذا وحده قد يكون كافياً لجعل الأنظمة الفاعلة مجدية اقتصادياً. وإذا ما ارتفعت أسعار

الوقود بما فيه الكفاية فربما سيدفع ذلك الحكومة إلى عرض محفزات تحركها السياسة الضريبية أيضاً. ويبقى الأخذ بالحسبان الاختلاف بين وجود جدوى أو نشاط اقتصادي (في بعض المناطق على الأقل) أو عدم وجودها قائماً على الرغم من وجود فرق في سعر النفط بين دولار واحد للغالون (أو أقل) إلى دولارين للغالون (أو أكثر)، مضافاً إليه التخفيض الضريبي على كتلة النظام الشمسي. ومما يجب توكيده أن الأنظمة الوحيدة التي ستستطيع أن تقفز بسرعة إلى المرحلة التجارية في حالة حدوث ارتفاع كبير في كلفة الوقود ستكون من نوع أنظمة تسخين الماء المنزلية. أما الأنظمة الشمسية ـ الحرارية للاستخدامات الصناعية فتحتاج إلى تطوير إضافي. ومع ذلك فإن التطوير ربما يبدأ على نطاق أوسع عندما تبدأ الطاقة الشمسية ـ الحرارية بالحلول محل المصادر التقليدية مسرعةً بذلك التوجه نحو تبنيها لكافة الإستخدامات.

وتبقى الطاقة الشمسية ـ الحرارية إجمالاً تكنولوجيا واعدة. فهي سليمة بيئياً ومتوافرة بصورة واسعة وربما تقدم طريقة لتوفير كميات لا يستهان بها من الوقود الأحفوري في المستقبل.

الوقود التركيبي من الكتلة الحيوية

الوقود التركيبي هو نوع من الوقود ابتدع في هيئة غازية أو سائلة ويمكن له الحلول محل أنواع الوقود الأحفوري مثل النفط والغاز. والمصدران الرئيسان لمثل هذه الأنواع من الوقود هما الفحم والكتلة الحيوية. والفحم كما رأينا في الفصل الثاني مصدر وقود أحفوري هائل في حين أن الكتلة الحيوية مصدر متجدد. وتشمل مصادرالكتلة الحيوية الخشب والحشائش وبعض أنواع المحاصيل. وسنقوم في هذا الفصل بالتركيز على الكتلة الحيوية بينما سنبحث في الوقود الحيوي من الفحم بصورة موجزة في الملحق ج.

يتطلب الحصول على الوقود التركيبي من مصادره الأصلية تفاعلات كيميائية من نوع أو آخر ينجم عنها مواد كيميائية جديدة لها المحتوى الحراري نفسه والحالة الفيزيائية نفسها (غازية أو سائلة) كالوقود التقليدي الذي ستحل محله. وهي بذلك في صنف يختلف عن أنواع الوقود الأحفوري البديلة مثل الرمال القيرية التي تحتاج إلى معالجة فيزيائية لإيجاد وقود غير ذي بنية كيميائية جديدة.

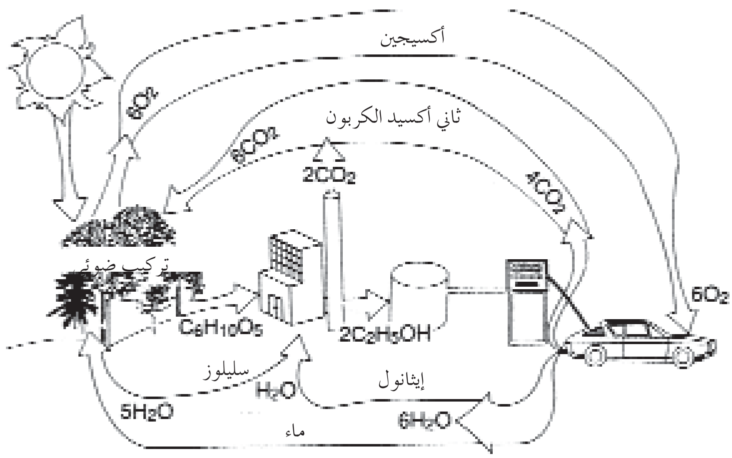
وربما يسأل منطقياً السؤال: لماذا تزعج نفسك بخطوة إضافية للمعالجة التركيبة عندما يكون الفحم أو الكتلة الحيوية قابلين للاستخدام كوقود بذاتهما ـ لماذا لا تحرقهما مباشرة؟ والجواب أنهما بصورتهما الاعتيادية غير قابلين للاستخدام كوقود للسيارات. إضافة إلى ذلك فهما مكلفان ويصعبان على الخزن والشحن في صورتيهما الطبيعية. والأشكال الغازية أو السائلة أسهل نقلاً وخزناً وأرخص عندما تكون بكميات كبيرة.

فكِّر في وقود السيارات. وقود السيارات التقليدي أي البنزين أو وقود الديزل مشتقان نفطيان. والنفط (سواء كان خاماً أو مشتقات مكررة) ينقل الآن بواسطة الأنابيب والناقلات البحرية والشاحنات بصورة سائلة بكل كفاءة. وتخزن أو تنقل كميات هائلة (ملايين البراميل) من النفط الخام والمنتجات المكرَّرة يومياً بصورة اعتيادية كما تخزن كميات أكبر في الاحتياطيات الاستراتيجية الوطنية. إن حجم الفحم أو الخشب مثلاً فقط يجعل نقل وخزن كميات الوقود ذات القيمة الحرارية المكافئة مشكلة أكبر بكثير. فالطاقة في ملايين الأطنان من الفحم أو الخشب مثلاً تساوي النفط المنقول (بجزء بسيط من الكلفة) في ناقلة بحرية عملاقة.

ووقود السيارات السائل اليوم سهل الحمل جداً. فخزان صغير سعة 15 غالوناً يوفِّر طاقة لتحريك سيارة ذات ماكينة احتراق داخلي لمسافة تربو على 300 ميلٍ. وسهولة الحمل هذه تشكل تحدياً لتكنولوجيات السيارات الأخرى تصعب معها المنافسة. فأي وقود أومصدر طاقة بديل يمكن أن يعوض عن النفط يجب أن يكون بدرجة سهولة النقل والخزن والحمل نفسها.

وأنواع الوقود الحيوي هي مواد عضوية بطبيعتها يمكن أن تحول إلى بديل مباشر للوقود الأحفوري. وتشمل هذه الموارد الطبيعية الخشب والمحاصيل والنفايات العضوية. وإذا كانت ستستخدم على مجال واسع بدل الوقود الأحفوري فيمكن أن تحقق انخفاضاً ملموساً في تلوث الهواء كما في تراكم غازات الدفيئة للبيت الزجاجي على المستوى العالمي (انظر الفصل السادس). ويتحقق تقليل غازات البيت الزجاجي لأن الوقود الحيوي يصنّع من النباتات. والنباتات بالطبع تحول ثاني أكسيد الكربون من خلال عملية التركيب الضوئي إلى كربون وأكسجين أثناء عملية النمو (انظر

الشكل 11-10). وذلك يعني أنه بينما يطلق احتراق الوقود الحيوي ثاني أكسيد الكربون فإن المصدر العضوي الذي اشتق منه قد عوض عن ذلك بإزالته من الجو حين كان محصول الطاقة أو الشجرة في طور النمو. وإذا ما قمنا بموازنة فإن تراكم غازات البيت الزجاجي من حرق الوقود الحيوي أقل بكثير مقارنة بحرق الوقود الأحفوري.



الشكل 11-10: دورة الكربون. بسماح من: U.S. Dept. of Energy

وسيعيد الاستخدام الواسع للكتلة الحيوية الجنس البشري إلى مصادر الطاقة التي استخدمناها عندما نشأنا كنوع حيوي على سطح الأرض. الخشب بالطبع كان تاريخياً المصدر الأصلي لطاقة الكتلة الحيوية ولايزال مصدراً رئيساً في العالم غير المتطور. ويقع الخث (Peat) والمخلفات الزراعية وروث الحيوانات إلى درجة أقل في هذا الصنف. وكان استخدام الخشب وبقية أنواع الكتلة الحيوية قد تناقص مع بدء الثورة الصناعية. واليوم حتى بعد إحياء استخدام الخشب كوقود فإن نسبة الطاقة الأولية المنتجة من كافة أنواع الكتلة الحيوية في الأقطار الصناعية لا تتجاوز 3 في المئة من مجمل الإنتاج. ومع ذلك فهناك إدراك متزايد بأن القاعدة الممكنة لمصادر الوقود الحيوي بما فيها الغابات المتحكم بها ومحاصيل الطاقة ومنتجات المخلفات العضوية واسعة ومتنوعة. ويمكن تحويل مثل هذه الموارد إلى وقود من نوع الميثان والكحول الأثيلي والتي يمكن أن تعوّض عن الغاز الطبيعي أو المنتجات النفطية المكررة. والوقود الكحولي وهو سائل مثل المنتجات النفطية المكررة، يشارك النفط

في سهولة نقله وخزنه وحمله. ويمكن له أن يعوض عن النفط في العديد من استخداماته الحالية وأبرزها استخدامه كوقود لوسائط النقل.

وقد برز التركيز على مصادر وقود الكتلة الحيوية نتيجة أزمة النفط في السبعينيات والتوقعات (التي لوحظت منذ الثمانينيات) حول التغير المناخي الكوني. وقد علّمت الأزمة النفطية العالم المتطور أن تجهيزات وقودها الأحفوري الرئيس – النفط – ليست آمنة وإنها في النهاية قابلة للاستنفاد. وبدأ العالم مؤخراً يواجه إمكانية حدوث تغيرات عميقة في مناخ الكون بسبب استخدامه الواسع للوقود الأحفوري. وتوفِّر الكتلة الحيوية إمكانية الوقود البديل المتجدد الذي يمكن أن يحل محل الوقود الأحفوري من دون إضافة غاز ثاني أكسيد الكربون إلى مناخ الأرض.

وستخدم الكتلة الحيوية كمادة تغذية للوقود البديل مثلما يخدم النفط الخام كمادة تغذية للبنزين وزيت التدفئة. والمتطلب الأول للتجهيزات المطلوبة من الوقود الحيوي هي على أي حال الإمكانية الكفوءة والكلفة المتدنية لإنتاج مادة التغذية من الكتلة الحيوية بشكل واسع. وهناك حاجة إلى ابتكارات رئيسة في الزراعة لتنمية محاصيل الطاقة وإدارة الغابات ولأداء ذلك بأساليب مقبولة بيئياً. وإذا ما تحقق ذلك استوجب الأمر تطوير إمكانيات إنتاج الوقود الحيوي وذلك بتحويل مواد التغذية إلى وقود قابل للاستخدام. وتتطلب هذه الإنجازات على وجه التأكيد برنامجاً بحثياً وتطويرياً واسعاً على المستوى القومي، غير أن الشكوك حول نجاحه تبقى قائمة بالرغم من هذه الجهود. وحتى إذا تحقق النجاح فإن تحويل ذلك إلى الاستخدام التجاري على نطاق واسع سيتطلب عقداً أو ربما أكثر.

موارد الكتلة الحيوية

تشمل موارد الكتلة الحيوية الحديثة الخشب ومحاصيل الطاقة والنفايات العضوية. وقد جرى مثلاً اختيار أجناس معينة من الأشجار والمحاصيل للدراسة والتجربة في مشاريع ريادية بسبب خواصها خلال النمو وسهولة إدارتها وأثرها البيئي. ويجري النظر في عدد من أساليب المعالجة البيوكيميائية بهدف تحويل هذه المصادر من الكتلة الحيوية إلى وقود تركيبي. وهناك إمكانيتان وهما التخمير والهضم غير الهوائي.

ويمكن إدارة الخشب ومحاصيل الطاقة للوصول بدورة الكربون في الطبيعة إلى حدود الكمال، مما يوصلنا إلى التوليد الصفري لثاني أكسيد الكربون (الشكل 11-10) وهو غاز البيت الزجاجي. وقد اقترح بالنسبة إلى الخشب استخدام أنواع الأشجار سريعة النمو مثل الحَور والجميز والصمغ الحلو لإنتاج الخشب في مزرعة أشجار «ذات مداورة سريعة». ويثبت نمو الأشجار الجديدة الكربون بوتيرة تبلغ ثلاثة أضعاف النمو للشجرة البالغة، وذلك إضافة إلى الإنتاجية الكبيرة للخشب (نحو 10 أطنان في الآكر - Acre - في السنة الواحدة). وتتماشى نسبة تثبيت الكربون للنمو الجديد مع نسبة توليد ثاني أكسيد الكربون من عملية احتراق الخشب (ويحوي الخشب نحو 50 في المئة من تركيبته الوزنية من الكربون الذي يصبح ثاني أكسيد الكربون نتيجة الاحتراق). وقد تبين أن مزارع الأشجار سريعة المداورة كثيفة الاستنبات أظهرت إنتاجية عالية جداً. وتستخدم هذه التقنية أشجاراً من أجناس سريعة النمو مزروعة على مسافات قليلة من بعضها وتحصد بين فترات قصيرة بحيث يصل إنتاج الأرض للآكر الواحد إلى حده الأعلى. وقد أنتجت مثالاً على ذلك مزرعة لشجر الجميز بمسافات تبلغ المترين بين الأشجار (وذلك يتيح زراعة 1200 شجرة في الآكر) تجنى على فترات تبلغ خمس سنوات ما مقداره على المعدل 5 أطنان من الخشب في الآكر في مناخات معتدلة. ويمكن إما أن يعاد زرع الأشجار بعد حصادها أو أن يعود الجذع الذي يبقى بعد القطع لينمو كما في بعض أجناس الشجر. ويمكن استحصال غلة أكبر في المناخ الاستوائي باستخدام أشجار مثل اليوكاليبتوس.

وتشكل محاصيل الطاقة (من غير الأشجار) مصدراً ممكناً مهماً آخر لوقود الكتلة الحيوية. ففي حين خدمت المخلفات النباتية تاريخياً كوقود للحرق المباشر (ومازالت كذلك في أقطار العالم النامي) توجد الآن إمكانات تكنولوجية لتحويل المحاصيل وكذلك المخلفات على مجال واسع إلى وقود غازي أو سائل. فالمحاصيل النشوية مثل الحنطة والذرة وقصب السكر قد برهنت على كونها مواد تغذية جيدة للتخمير لإنتاج الإيثانول وهو كحول يستخدم كمضاف إلى البنزين أو حتى كبديل له. ويتبين من البحوث الحديثة وجود إمكانية لتحويل المواد السيليلوزية[5]

5- السيليلوز هو الجزء الخشبي من النبات وهو يمتلك من الناحية الكيميائية بوليمر عضوي سلسلي يشابه ذلك الموجود في النشاء. وكل من السيليلوز والنشاء يقعان ضمن الصنف نفسه من البوليمرات المدعو كربوهيدرات الذي تبين معادلته الكيميائية (المدعوة هيدرات) ارتباط الكربون مع جزيئة الماء. ويمتلك السيليلوز الصيغة الكيميائية=

أيضاً إلى إيثانول، وذلك ما يوسع مصادر الوقود الحيوي. ولا يقتصر هذا على زيادة غلة الكحول من المحاصيل النشوية، من خلال السماح بتحويل الجذوع والأوراق، بل إنها تتيح الآن استخدام مصادر سيليلوزية بالكامل مثل الخشب والحشائش لإنتاج الوقود الكحولي. وقد حفز هذا البحث برنامجاً للبحث والتطوير على إنتاج الخشب والطاقة العشبية موسعاً بذلك إمكانيات إنتاج الوقود الحيوي السائل والغازي (Bull, 1991).

قدرت إدارة الطاقة في الولايات المتحدة الأرض الممكن تخصيصها لمحاصيل الطاقة في الولايات المتحدة بنحو 200 مليون آكر. تشمل هذه المساحة أراضي إنتاج المحاصيل الغذائية غير المستغلة إضافة إلى أراضي المراعي والغابات التي بإمكانها إنتاج محاصيل الطاقة. وتقع معظم الأرض البور في الولايات المتحدة في الثلثين الشرقيين من البلد مع أكبر تركيز في الغرب الأوسط والجنوب. وتبلغ الأراضي المستغلة حالياً في الولايات المتحدة لإنتاج الغذاء نحو 300 مليون آكر.

وهناك نحو 200 مليون آكر إضافية تصنف كأراضي للمحاصيل الزراعية لكنها لا تستغل كذلك. وهناك من بين كل هذه الأراضي النصف أو نحو 250 مليون آكر صالحة لتنمية محاصيل الطاقة من دون إرواء (انظر الشكل 2-12). وهناك إمكانية إنتاج ما يعادل 25 كواد في السنة من الطاقة الأولية في هذه الأراضي وذلك ما يعادل ثلث احتياجات القطر الحالية من كافة أنواع الطاقة.

وتوفر الأنواع الجديدة من محاصيل الطاقة مثل الخشب والأعشاب فائدة أخرى

= $C_{12}H_{20}O_{10}$ بينما يمتلك النشاء (النقي) المعادلة $C_6H_{10}O_5$ وكلاهما يمتلك الهيدروجين والأكسجين بالنسب الجزيئة الموجودة في الماء (H_{20}). ويمكن أن يكسر كلاهما إلى سكريات قابلة للتخمير لكن السيليلوز أصعب كثيراً عند تكسيره (إن السكريات المدعوة سكروز وغلوكوز تصنف كيميائياً على وجه الدقة ككربوهيدرات أيضاً، رغم أن المعنى المتداول لهذا التعبير ينطبق فقط على الأطعمة النشوية مثل البطاطا).

إن تكسر الكاربوهيدرات إلى سكريات يمكن أن يصور بطريقة الهضم. فالأغذية النشوية مثلاً تتفكك بالحمض في معدة الإنسان إلى غلوكوز لتوافر السكر في الدم للطاقة العضلية. وتدعى عملية التفكك بالتحلل المائي لأن أيونات الهيدروكسيل (OH) من الماء تدخل الخلية العضوية الشبيهة بالسلسلة لتوليد الجزيئة العضوية الجديدة وهي في هذه الحالة الغلوكوز. ولا يمكن من الناحية الأخرى تحليل السيليلوز مائياً إلا بواسطة إنزيمات خاصة مثل تلك الموجودة في القناة الهضمية للبقر والحيوانات المجترة الأخرى. ويجري بمساعدة هذه الإنزيمات تحليل الحشائش (السيليلوزية) إلى سكريات يمكن بعد ذلك امتصاصها في مجرى دم الحيوان كمغذيات توفِّر الطاقة. ومن دون مثل هذه المساعدة لعملية التحليل المائي لا يمكن للحيوان هضم الحشائش.

فهي تُزرع كمواد تغذية للطاقة فقط. أما محاصيل الطاقة والتي هي محاصيل غذائية مثل الذرة والسكر فقد يترتب عليها مواقف غير مرغوب فيها مثل ربط سوق المواد الغذائية وسوق الطاقة وذلك ما يشوه أسعار المواد الغذائية. وعندما تؤثر الأسعار في أحد الأسواق في أسعار سوق آخر فإن أثر ذلك يدعى «تقاطع الأسواق». وقد عانت البرازيل مثلاً تقاطع أسواق ملحوظاً عندما بدأت إنتاج وقود الإيثانول من السكر على نطاق واسع. فقد قفز سعر السكر بسبب الطلب الكبير على قصب السكر لإنتاج الطاقة. ولن يحدث مثل هذا التقاطع في الأسواق عندما يقتصر الاستخدام على المحاصيل غير الغذائية لإنتاج الوقود الحيوي.

ولن يقتصر الأمر عند إدراج المحاصيل السيليلوزية على توسيع مدى موارد الكتلة الحيوية، بل يعني حاجة أقل للأسمدة ومدخلات الطاقة الزراعية مما هو مطلوب للمحاصيل مثل الذرة. فالحشائش المعمرة من نوع الدخن العضوي (Switch Grass) تحتاج إلى مقادر أقل بكثير من السماد لنموها (السريع) مقارنة بمحاصيل الحبوب لأن معظم مغذيات التربة تبقى بعد حصاد (قطع) الحشائش. ويجري حصد الحشائش بطريقة أكثر كفاءة من معظم المحاصيل مثل الذرة، وبذلك تحتاج إلى صرف أقل على الطاقة (الوقود) في الإنتاج الزراعي. ويحتاج الخشب بطريقة مشابهة أقل من نصف مدخول الطاقة (سماد ووقود) مقارنة بالذرة. والمقياس المهم لكفاءة أي من مغذيات الوقود الحيوي هو الجزء من منتوجها المستخدم كطاقة مطلوبة كمدخل في عملية إنتاجها.

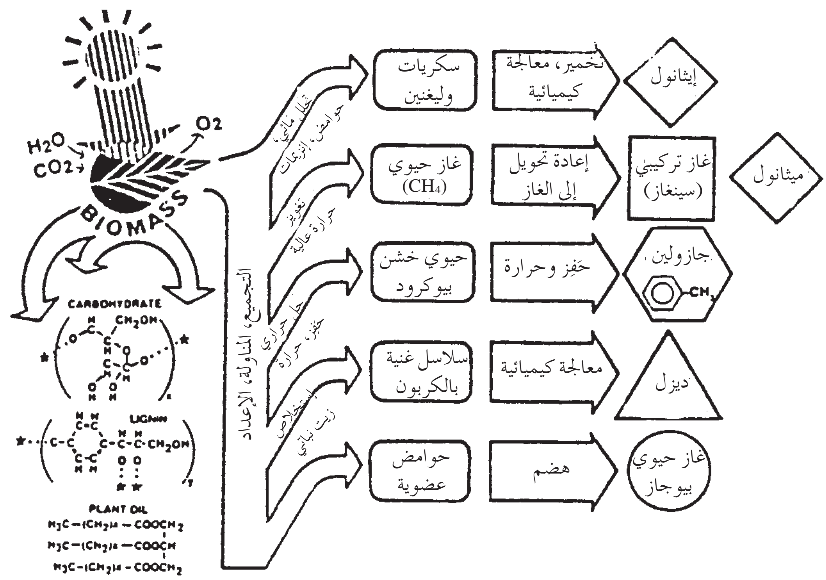
طرق المعالجة لإنتاج الوقود الحيوي

هناك عدد من المسالك التكنولوجية لتحويل الكتلة الحيوية إلى وقود سائل أو غازي. وهي طرق إما بيوكيميائية أو كيموحرارية (الشكل 11-11). والأمثلة البارزة للطرق البيوكيميائية هي التخمير لإنتاج الإيثانول، والهضم غير الهوائي لإنتاج الغاز التركيبي المشتق من الميثان. وتشمل الطرق الكيموحرارية التحلل الحراري يتبعه في معظم الحالات معالجات حفازة ومعالجات إزاحة من النوع المستخدم في الغاز التركيبي ذي الأساس الفحمي (انظر الملحق ج). وسنبحث في الأقسام الآتية في المعالجات لإنتاج الإيثانول وهو وقود سائل والميثان وهو وقود غازي.

الوقود الحيوي السائل

يمتلك الوقود السائل أهمية خاصة لإمكانية تعويضه عن الوقود الحيوي لأغراض النقل – أي من البنزين ووقود الديزل. وإذا كان بالإمكان إنتاج الوقود الحيوي السائل مثل الكحول بأسعار تنافسية بطرق الإنتاج الكثيف، فسيمكن أن ننتقل بالمنافع التكنولوجية والاقتصادية لماكينة الاحتراق الداخلي إلى عهد جديد من الطاقة المستدامة. وسيكون للوقود الحيوي أيضاً فوائد ملحوظة على البنزين في أنه يولد غازات بيت زجاجي وملوثات جوية أخرى أقل. وتنفث أنواع الوقود النفطي المستخدم في وسائط النقل الآن 27 في المئة من ثاني أكسيد الكربون الذي يولده الإنسان في الولايات المتحدة. إضافة إلى ذلك هناك مئة منطقة مدينية في الولايات المتحدة تخالف بسبب ما تنفثه السيارات معايير نوعية الهواء السائد من حيث تركيز الأوزون وأربعون منطقة تخالف المعايير المتعلقة بأول أكسيد الكربون. ويحتفظ الوقود الحيوي السائل الذي يمتلك محتوى النفط نفسه من الطاقة بفوائده من حيث سهولة النقل والحفظ. كما إنه يحتفظ أيضاً بسهولة «الحمل» التي يتمتع بها البنزين وهذا يعني أن خزان وقود واحد من الوقود الحيوي السائل يعطي مدى القيادة والسرعة نفسه التي تتمتع بها السيارات التي تستخدم الوقود الأحفوري. وكانت هذه بعض المنافع التي استُشهد بها لدعم برامج الوقود التركيبي المشتق من الفحم في السبعينيات (انظر الملحق ج).

والكحول سواء كان من النوع الإثيلي أو النوع الميثيلي تبدو أكثر أنواع الوقود الحيوي وعداً. وهي من الناحية الكيميائية مشتقات للماء حيث يحل جذر هيدروكربوني محل إحدى ذرتي الهيدروجين في جزيئة الماء ليتحد مع جذر الهيدروكسيل (OH) المتبقي. وأبسط أمثلتها هو الميثانول الذي يمتلك المعادلة CH_3OH حيث يتحد جذر الأثيل CH_3 مع الهيدروكسيل OH. والاسم الدارج للميثانول هو «كحول الخشب» لأنه كان تاريخياً يشتق من الخشب. والميثانول كوقود بديل ليس بالمثالي لأنه شديد السمّية وخطير إذا ابتلع أو استنشق أو حتى إذا تكررت ملامسته للجلد. ويتوقع أن يكون لطرق تصنيعه كذلك أثر بيئي أكبر من تصنيع الإيثانول.



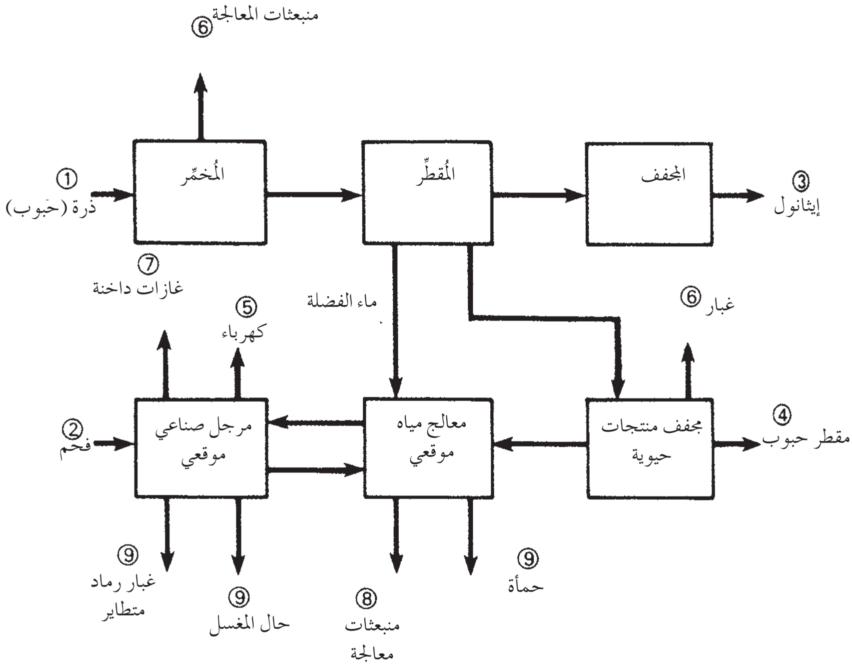
الشكل 11-11 مسالك تحويل الكتلة الحيوية إلى مادة تغذية للوقود السائل والغازي.
بسماح من .U.S. Dept. of Energy 1991

ويعتبر الإيثانول (C_2H_5OH) المعروف بـ «كحول الحبوب» من قبل العديد من المحللين أفضل مرشح ليصبح الوقود الحيوي السليم بيئياً. ويجري اشتقاقه من مواد مغذية من الكتلة الحيوية ـ وهي تاريخياً الحبوب أو السكر ـ بواسطة التخمير والتقطير، وهي الطريقة المستخدمة نفسها لصنع المشروبات الكحولية. ومع ذلك، حاول الباحثون، كما لاحظنا في تجربة المحاصيل العشبية والحشائش وحتى الخشب، اختبارها كمواد تغذية لصناعة الإيثانول.

وقد جرى استخدام التخمير تاريخياً مع مواد التغذية السكرية أو النشوية. ويحدث مع مواد التغذية السكرية من دون أي معالجة سابقة، بينما تحتاج المواد النشوية إلى الخضوع لعملية التحلل المائي. وكان إنتاج الإيثانول على مجال قليل مستخدماً في الولايات المتحدة وفي أماكن أخرى خلال القرن العشرين. وقد انتقلت العملية في البرازيل إلى المستوى الواسع خلال العقدين المنصرمين. ويتجاوز إنتاج الإيثانول في البرازيل من تخمير السكر (السكروز) من القصب حالياً نصف مليار غالون سنوياً. أما في الولايات المتحدة فقد كانت الذرة هي مادة التغذية الرئيسة إنما على مجال أصغر جداً من إنتاج البرازيل.

وينتج التخمر في عملية صنع الإيثانول من تحلل سكر الغلوكوز بتأثير فعل الإنزيمات. فالمولاس (أو دبس السكر) يحوي ما يزيد على 50 في المئة من الغلوكوز، وبإضافة مستنبت (malt) لتزويد الإنزيمات يتحول دبس السكر مباشرة إلى كحول إثيلي. وعندما تكون مادة التغذية كاربوهيدراتية (أي مثل الذرة) يتطلب الأمر تفاعلات إنزيمية وسطية تحول النشاء إلى سكروز أولاً ثم تحول السكر إلى غلوكوز والسكروز ($C_{12}H_{22}O_{11}$) هو سكر المائدة العادي مشتق عادة من النباتات مثل سكر القصب أو الشمندر. والغلوكوز ($C_6H_{12}O_6$) هو السكر المستخدم عادة في عملية التخمير.

وتحتاج عملية التخمر إلى عدة أيام لتكتمل ويصار عندئذٍ إلى تقطير المزيج الهريس المتولد. وناتج التقطير هو 96 في المئة من الإيثانول مع 4 في المئة جزءاً مائياً مع رواسب صلبة. ويجب تجفيف مزيج الإيثانول – الماء قبل استخدامه كوقود في خطوة منفصلة، كما مبيّن في المخطط في الشكل 11-12.



الشكل 11-12: مخطط تدفق المعالجة لمصنع تخمير الذرة لصنع الإيثانول.

المصدر: Energy Technologies and The Environment, June 1981, U.S. Dept. of Energy, Report No. DOE/EP0026. Available from National Technical Information Service, Springfield, VA 22161.

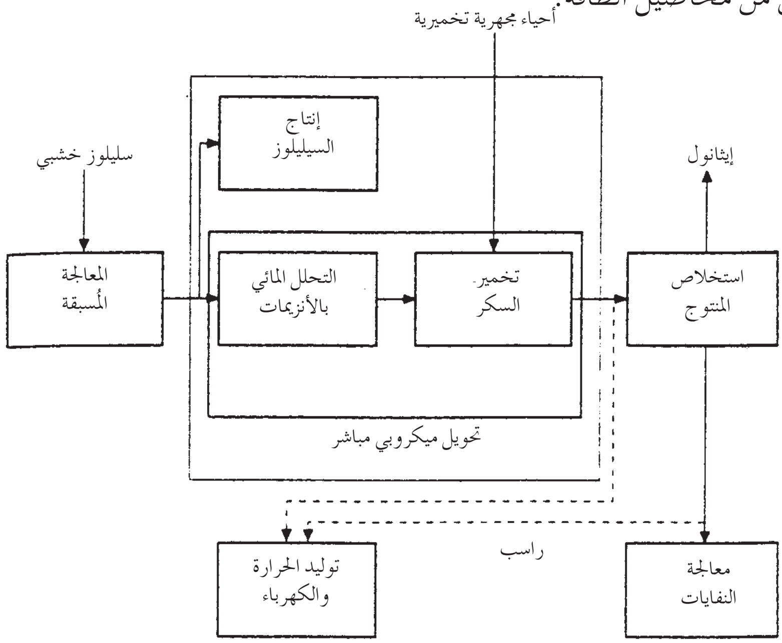
تحتاج عملية التخمير الشاملة لصنع الإيثانول إلى عمليات معالجة مساندة تضيف إلى كلفة الإنتاج. وإحدى الاحتياجات الرئيسة يتمثل في مرجل الحرارة لتقطير وتجفيف الكحول وتجفيف الرواسب الصلبة. لكن بعض أجزاء مادة التغذية مثل الأجزاء القابلة للاحتراق من المنتجات الغذائية يمكن أن تستخدم كوقود يجنب كلفة شراء الفحم أو النفط. ويتخلف عن تخمّر الإيثانول كذلك منتجات عَرَضية يمكن أن تباع لتعوض جزئياً عن كلفة الإنتاج.

ويحتاج تخمير النشويات إلى خطوات إضافية وإلى أنواع مختلفة من الإنزيمات. فالنشويات يجب أولاً أن تطحن وتطبخ حتى تتحول إلى هلام. بعد ذلك تضاف سلالات خاصة من الخميرة لتزويد الإنزيمات التي تحولها إلى غلوكوز. وتقوم خمائر أخرى بعد ذلك بتزويد الإنزيمات التي تساعد على تخمر الغلوكوز ليصبح إيثانول. وباستطاعة أنواع خاصة من البكتيريا أيضاً تخمير الغلوكوز وتحويله إلى إيثانول بكفاءة (بتحويل ما يربو على 90 في المئة من الغلوكوز إلى كحول). أما التحلل المائي للمواد السيليلوزية إلى سكريات قابلة للتخمر فلا يزال أصعب من تحليل النشويات مائياً، غير أن جهود البحث والتطوير الأخيرة قد أعطت نتائج واعدة. فقد وجد أن محفزات حامضية خاصة أو إنزيمات يمكن أن تقوم بعملية التحليل المائي للسيليلوز. ومع ذلك يجب أن تسبق ذلك معالجات تجعل المادة السيليلوزية أسهل هضماً. وتشمل عمليات المعالجة المسبقة هذه التقطيع الآلي والسحق والطحن أو استخراج اللب بطرق كيميائية.

والتحفيز بالحوامض رغم كفاءته، عملية مكلفة بالتركيزات المطلوبة للحصول على غَلَة عالية من السكر. لذا يبدو أن التحلل المائي بواسطة الإنزيمات، هو المرشح المفضل لتحويل السيليلوز بكلفة أقل وللحصول على غلة عالية. وتنتَج هذه الإنزيمات من قبل نوع خاص من البكتيريا أو من الفطريات المحورة جينياً.

والاعتبار الخاص في معالجة المادة السيليلوزية للتخمير هو التحليل المائي لمركبين متميزين ـ السيليلوز ونصف السيليلوز (Hemicellulose). ففي الإمكان تحليل بوليمر السيليلوز بصورة مباشرة إلى غلوكوز. أما نصف السيليلوز فهو يتحلل من ناحية أخرى إلى الزايلوز (Xylose) بصورة رئيسة الذي يمتلك بنية بوليمرية مشابهة.

بعد ذلك يحتاج الزايلوز إلى سلاسل خاصة من الخميرة كعامل محفز للحصول على التخمير. إن التفكك الإضافي لجزء نصف السيليلوز حتى يتهيأ للتخمر يعد عاملاً حاسماً لزيادة الإنتاجية وخفض كلفة الكحول من المحاصيل السيليلوزية والأخشاب، لذا فهو يستحق التدابير الإضافية في المعالجة. والمحاصيل العشبية (وهي سيليلوزية إنما ليست خشبية) تحوي نحو 45 في المئة من السيليلوز و30 في المئة من نصف السيليلوز، في حين أن الخشب الصلب يتألف من 50 و23 في المئة من هذه المواد على التوالي. لذا فإن تحويل الجزء نصف السيليلوزي أمر مهم لكلا النوعين من محاصيل الطاقة.



الشكل 11-13: التسكير والتخمير المتزامنين
ملاحظة: السيليلاز هو إنزيم يساعد في التحلل المائي للسيليلوز.
مقتبس من .Johansson [et al.], 1993

وقد وجدت البحوث أن مواد التغذية السيليلوزية (مثل كسر الخشب) يمكن أن تغذى بعد سحقها في عملية معالجة مسبقة إلى عملية معالجة تمزج بين التحلل المائي والتخمر. وتدعى هذه العملية المزدوجة باسم «عملية التسكير والتخمير المتزامنة» (SSF) (انظر الشكل 11-13). ويخضع السيليلوز فيها إلى عملية تحلل مائي بمساعدة إنزيمات بوجود الخمائر التي تخمر الغلولكوز حال تكونه. ويتخمر الزايلوز في

الوقت ذاته – وهو ينتج من التحلل المائي أيضاً – مستخدماً سلالات خاصة من الخمائر كعوامل محفزة مع تهوية مسيطر عليها بطريقة دقيقة. وتَعِد هذه التقنيات المطورة حديثاً بإنتاجية عالية من خلال تحول المادة السيليلوزية إلى إيثانول.

والمادة العضوية المتبقية في مواد التغذية السيليلوزية هذه هي الليغنين[6] وهو لا يتحول بسهولة في أي من معالجات التحليل المائي إلى سكريات قابلة للتخمير. ويؤلف اللغنين عادة 22 في المئة من الأخشاب الصلبة و15 في المئة من المواد العشبية. ويمكن على أي حال حرق رواسب الليغنين التي تنتج عند تصنيع الإيثانول بصورة مباشرة لتوفير الحرارة المطلوبة للتقطير أو للتوليد المزدوج، ويساهم ذلك في تحسين نسبة الطاقة لعملية إنتاج المادة السيليلوزية (إن مثل هذا الاستخدام لجزء من مادة التغذية يدعى «الوقود الحبيس»).

وتمتلك الكحولات مثل الإيثانول منافع ومضار عند استخدامها كوقود سيارات. (ويمكن أن تستخدم بصورة كحول نقي أو كمزيج مع البنزين). والإيثانول مثلاً يمتلك عدداً أوكتانياً أعلى[7] من البنزين مما يتيح استخدام نسب انضغاط أعلى في المحرك (انظر الفصل الثالث)، والذي يمكن أن يؤدي بدوره إلى تصاميم محركات ذات اقتصاد أكبر للوقود. ويسهّل استخدام نسبة انضغاط أعلى أيضاً إعطاء قوة أكبر في زمن أسرع لغرض التعجيل. والإيثانول من ناحية أخرى يمتلك محتوى طاقة أقل في وحدة الحجم مما يعني مسافة أقصر للرحلة في خزان الوقود نفسه. ومع استخدام التصميم

6 ـ الليغنين (lignine) هو المادة العضوية الموجودة في جدران خلية العديد من الأصناف النباتية وبخاصة تلك ذات البنية الصلبة كالخشب أو القنب أو السيسال. والليغنين في الحقيقة هو المركب الأساسي الذي يوفّر الجساءة في سيقان وأوراق النباتات والأشجار. ورغم أنه يصنع في النبات من المواد الهيدروكاربونية إلا أنه ليس مادة هيدروكربونية. والمعروف أن بنيته العضوية تحوي سلاسل طويلة ذات وزن جزيئي عالٍ يؤلف الكربون ثلثيها تقريباً. وما زالت بنيته الجزيئية موضوع بحث في بيوكيمياء النبات.

7 ـ الرقم الأوكتاني هو مقياس لإمكانية تجنب الفرقعة (anti- knock) في مزيج خاص من البنزين ويتراوح المقياس بين 0 – 100. والبنزين ذو الرقم الأوكتاني البالغ 100 يمثل أكثر أنواع الاحتراق المرغوبة من حيث احتراقه البطيء والمنتظم في أسطوانة المحرك (انظر الفصل الثالث) من بين المكونات الهيدروكربونية للنفط. وفي النهاية الأخرى هناك المزيج ذو الرقم الأوكتاني (0) وهو عرضة للفرقعة بدرجة تزيد على أي مادة هيدروكربونية ويمثله الهيبتان. ويجري تقدير الرقم الأوكتاني لأنواع المزيج العديدة الممكنة للمواد الهيدروكربونية المتطايرة من نواتج تكرير النفط باستخدام هذا المقياس الأوكتاني. ولما كانت أنواع الوقود ذات الرقم الأوكتاني الأعلى تزود أعلى قوة فإنها المرغوبة أكثر من غيرها ولما كانت الأجزاء المكررة التي توفر هذا النوع محدودة يزداد سعر البنزين ذي الرقم الأوكتاني العالي.

الأمثل للمحرك الذي يستخدم الإيثانول يمكن تحقيق 80 في المئة من المدى للمحركات المقارنة التي تعمل بالبنزين من نفس حجم خزان الوقود. ومن سيئات الكحول أيضاً أن قابليته على التبخر أقل من البنزين الذي يجعل مميزات بدء القيادة في المناخ البارد سيئة ويتطلب الأمر تسخيناً مسبقاً للمحرك في الأغلب*.

والوقود الكحولي – والإيثانول خاصة – يتفوق على الوقود النفطي من حيث التأثيرات البيئية. فدرجة حرارة احتراق الكحول الأوطأ ينجم عنها انبعاثات أقل لأكاسيد النيتروجين (NOx) (انظر الفصل السادس). وتؤدي هذه الخاصية مع غياب الأبخرة الأروماتية من تبخر البنزين إلى التقليل من الضباب الدخاني البتروكيميائي ومن تكون الأوزون على المستوى الأرضي. ومن الممكن تقليل المنبعثات التبخرية أو المركبات العضوية المتطايرة (VOCs) التي تسبب نسبة كبيرة من مشاكل تلوث الهواء في كاليفورنيا بنسبة 90 في المئة بالاستبدال الكامل لأسطول السيارات العاملة بالبنزين بأخرى تعمل بالكحول. حتى إن مزيج الكحول/ البنزين له انبعاثات أول أكسيد الكربون أقل من البنزين الصرف رغم أن بقية الآثار البيئية تبقى ذاتها.

ويبدو أن الإيثانول هو الأفضل عملياً من بين نوعي الكحول ويفضل على النوع الميثيلي لأسباب بيئية. فلا توجد مثلاً مواد ذات آثار مسرطنة أو ذات أثر في الجينات بين نواتج احتراق الإيثانول بينما نجد أن هناك شكاً في كون الفورمالايهايد وهو أحد نواتج احتراق الوقود الميثيلي عاملاً مسرطناً. كما إن مزج الميثانول مع البنزين يمكن أن يؤدي إلى نسب تبخر أعلى للهيدروكربونات. إضافة إلى ذلك يمثل الميثانول وكما ذكرنا سابقاً مخاطر سُميّة أعلى أثناء استخدامه مقارنة بالإيثانول أو بالبنزين أيضاً. ويتطلب تصنيع الميثانول من الكتلة الحيوية طريقة معالجة مشابهة إلى التسييل غير المباشر للوقود المشتق من الفحم (انظر الملحق ج). ويمكن على أي حال استخدام طريقتين في مرحلة تصنيع الميثانول الأولى وهي تحويل الفحم إلى غاز. الطريقة الأولى هي طريقة هضم غير هوائية بيولوجية تنتج الميثان، أما الطريقة الثانية فهي ببساطة تفاعل كيميائي ينتج الهيدروجين وأول أكسيد الكربون. وسنبحث في الهضم غير الهوائي لإنتاج الميثان في القسم التالي.

* هذا صحيح بالنسبة إلى المحركات التي تعمل بالمكربن (Carburettor). أما بالنسبة إلى المحركات الحديثّة العاملة بحقن الوقود فلا تأثير لهذه الخاصية في الكحول على أداء المحرك.

والوسيلة البديلة لتوليد تركيب غاز الميثان لتصنيع الميثانول تستخدم جهاز التحويل إلى غاز. وتشابه هذه الطريقة التي تستخدم الخشب كمادة تغذية الطريقة التي توصف في الملحق ج بالنسبة إلى الفحم. ويعمل الجهاز الأصلي وجهاز التحويل إلى غاز على تحليل الخشب في جو يفتقر إلى كمية كافية من الأكسجين في ضغوط ودرجات حرارة عالية لإنتاج غاز تركيبي يتألف بصورة رئيسة من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون. ويعرض هذا الغاز بعد غسله من ثاني أكسيد الكربون لتفاعل التغير المائي – الغازي (Water-Gas Shift Reaction) (انظر الملحق ج) الذي ينتج منه مزيج الهيدروجين – أول أكسيد الكربون لتغذية المرحلة التالية: التحول المحفَّز. وينتج من التحول المحفز في هذه الحالة الميثانول السائل والماء وبعض الملوثات ويجري تقطير المنتوج لاستخلاص منتوج نهائي من الميثانول.

الوقود الحيوي الغازي

يمكن لأنواع الوقود الحيوي الغازي الذي يتألف بصورة رئيسة من غاز الميثان (CH_4)[8] أن يحل محل الغاز الطبيعي لتزويد الحرارة للمتطلبات التجارية والمنزلية ولعمليات المعالجة الصناعية. ويمكن تصورياً أن يحل الوقود الغازي الحيوي محل الغاز الطبيعي كوقود لمحطات توليد الكهرباء الموقودة بالغاز أيضاً. ولكي يعوض ميثان الكتلة الحيوية عن الغاز الطبيعي بصورة مباشرة يجب أن يكون من «نوعية غاز خطوط الأنابيب» في محتواه الحراري (نحو 1000 وحدة حرارية بريطانية للقدم المكعب القياسي).

ويمكن إنتاج الوقود الحيوي الغازي من التفاعلات البيوكيميائية مثل التحلل غير الهوائي أو بوسائل حرارية كيميائية من نوع التحلل الحراري أو التحويل إلى غاز ـ التغويز ـ (Gasification). والطريقة البيوكيميائية الرئيسة لإنتاج الميثان هي الهضم غير الهوائي. والهضم غير الهوائي هو طريقة المعالجة التي تكسر فيها المادة العضوية إلى

8 ـ الميثان هو الأبسط بين عائلة من المركبات العضوية المدعوة (ألكانات Alkanes). وتتألف جزيئة الألكان من ذرات كربون لها أواصر اتصال مع أربع ذرات مجاورة إمّا من الهيدروجين أو الكربون. والميثان فيه ببساطة ذرة كربون واحدة متصلة بأربع ذرات هيدروجين لذا يمتلك المعادلة CH_4. ونجد الكثير من الألكانات في النفط مثل البيوتان والأوكتان. والميثان بالطبع المكون الرئيس في الغاز الطبيعي (الإحفوري) الذي يتواجد في مكامن تحت الأرض مصاحباً للنفط أو بصورة حرة بذاته حيث يعتقد أنه تكون نتيجة عمليات بيولوجية طبيعية قبل ملايين السنين.

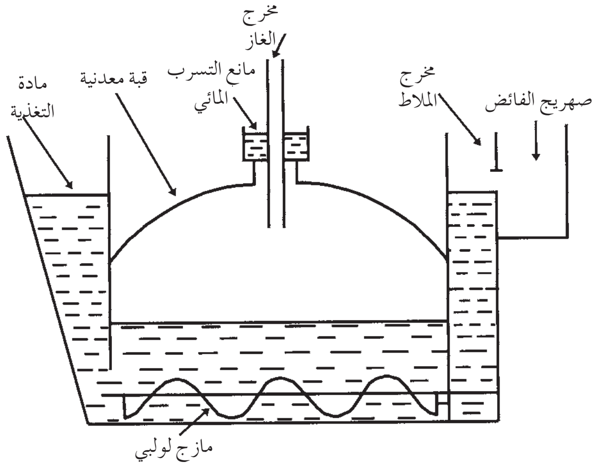
ميثان (ومواد أخرى) بتأثير البكتيريا في جو يعوزه الأكسجين. وهذه الطريقة معروفة منذ القرن التاسع عشر لكنها أهملت في العالم الصناعي مع استهلال عصر الوقود الأحفوري الرخيص. إلا أن الاهتمام بها استعيد مع أزمة النفط في السبعينيات.

وقد استخدمت أجهزة هضم الميثان بصورة واسعة في الأقطار المتطورة الأقل نمواً خلال العقدين الماضيين وهناك ملايين منها قيد الاستخدام اليوم. وتغذى أجهزة الهضم في العالم الثالث في الأغلب بروث الحيوانات وتوفِّر صورة بسيطة لكيفية عمل الأجهزة الهاضمة. ويتألف الهاضم النموذجي (انظر الشكل 11-14) من غرفة هضم وقبة معدنية فيها أنبوب مخرج للغاز ومدخل ومخرج للمواد الصلبة ولولب للمزج. ويمكن أن تكون غرفة المزج صهريجاً حديدياً أو ببساطة حفرة في الأرض مبطنة بالآجر أو الحجر. ويتطلب الأمر بعض التحريك أو المزج. وتحتجز القبة المعدنية الثقيلة الغاز الحيوي فوق مستوى الملاط وتحافظ عليه تحت ضغط للإطلاق خلال انبوب خروج الغاز.

كما جرى أيضاً بناء وتشغيل هاضمات للنفايات الزراعية ذات تحكم متقن في الأقطار الصناعية أيضاً. وتصمّم هاضمات الميثان في الأقطار الصناعية لتستخدم أوحال المجاري أو المواد العضوية في المخلفات الصناعية. ومن بين الصناعات التي تستخدم المعالجة غير الهوائية لمياه الصرف صناعات معالجة المواد الغذائية والألبان والصناعات الصيدلانية وصناعة الورق ولب الورق وإنتاج الكحول. وتعتبر مكبات النفايات البلدية مصدراً آخر للميثان غير الهوائي. و يكون التفسخ في هذه المكبات جارياً في الجو المفتقر للأوكسجين في أسفل المكب، والغاز الناتج ذو محتوى حراري متوسط إذ إن محتواه من الميثان يبلغ نحو 50 في المئة. ومن الممكن جمع غاز المكبات واستخدامه كوقود إذ إنه يجب بخلاف ذلك أن يُنفّس إلى الجو ويحرق لدواعي السلامة.

يتألف الغاز الحيوي الناتج في أجهزة الهضم من 50 إلى 65 في المئة من الميثان والبقية معظمها من غاز ثاني أكسيد الكربون اعتماداً على مادة التغذية واكتمال العملية. ويضع هذا الهاضمات في صنف الغازات متوسطة المحتوى الحراري لأنه لن يكون من نوعية غاز خطوط الأنابيب ما لم يكن محتواه من الميثان يبلغ 100 في المئة تقريباً. وتتراوح أحجام الغاز الحيوي المنتج ذو محتوى من الميثان يبلغ 50 في المئة

لكل باوند (وزناً) من مادة التغذية بين 5 ـ 10 قدم مكعب والذي سيمتلك القيمة الحرارية المساوية لـ 2.5 ـ 5 قدم مكعب من الغاز الطبيعي.



الشكل 11-14: جهاز هضم الغاز الحيوي المستخدم في العالم الثالث.
مقتبس من **Dun, 1986.**

وللميثان استخدامات أخرى بجانب التسخين فيمكن أيضاً استخدامه كمدخل لخلايا الوقود (انظر الملحق ج) لتوليد الكهرباء. وقد شجعت وكالة حماية البيئة في التسعينيات على اللجوء إلى توليد الطاقة باستخدام الميثان من مكبات النفايات في خلايا وقود موقعية. كذلك يجري استخدام توربينات احتراق ومحركات مكبسية تستخدم الميثان كوقود (انظر الفصل الثالث) لإدارة مولدات كهربائية تقليدية على مواقع مكبات النفايات. وهذه المولدات عادة ذات سعة توليد متواضعة (أقل من ميغاواط واحد) وليس لها أهمية تجارية كبيرة. وتعوض مدخولات توليد الكهرباء هذه مثل بقية مشاريع تحويل النفايات إلى كهرباء (انظر الملحق ج) ولو جزئياً كلفة التخلص من النفايات للسلطات البلدية. وتستخدم محطات الغاز من مكبات النفايات في النمسا وفرنسا وفنلندا وبريطانيا وتاهيتي أيضاً والسعة السنوية تبلغ على المعدل عشرات الآلاف من الأطنان من النفايات. وهناك في الولايات المتحدة نحو 5000 مكب يمكن استخدامها لاستخلاص الغاز وينتج منها نحو 0.2 كواد من الطاقة سنوياً وليس سوى جزء صغير من استهلاك الطاقة القومي البالغ 80 كواد (انظر الفصل الرابع) لذا فإنه لا يمثل إمكانية كبيرة لتزويد الطاقة على المجال القومي.

الإنتاج الكيمو حراري

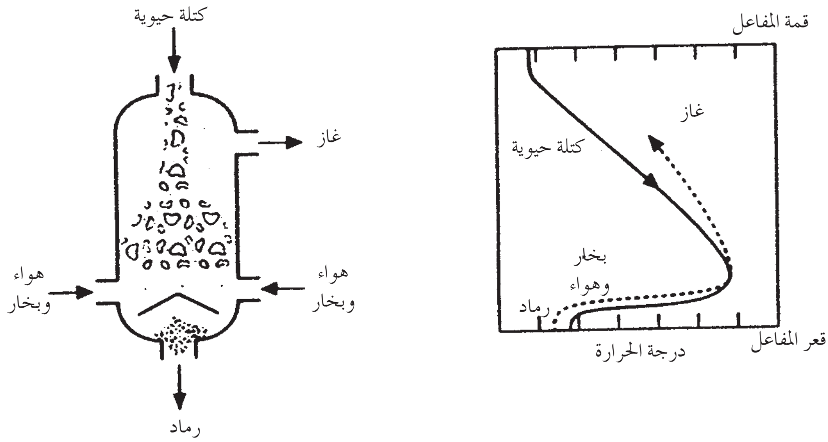
تمثل المعالجة الكيميائية الحرارية الإمكانية الأفضل للإنتاج الكثيف لغاز الوقود الحيوي. ويمكن أن تعالج مواد التغذية من الكتلة الحيوية مثل الخشب ومخلفات المحاصيل العشبية بطريقة كيميائية حرارية لإنتاج الوقود الغازي. والمواد القابلة للاحتراق المحتواة في منتجات المعالجة الكيميائية الحرارية للتحويل الغازي هي الميثان (CH_4) والهيدروجين (H_2) وأول أكسيد الكربون (CO) بنسب مختلفة. وذروة الإنتاج للوقود الغازي هو غاز ذو محتوى حراري عالٍ قريب من نوعية غاز خطوط الأنابيب في ما إذا كان مشتقاً من الكتلة الحيوية أو الفحم (انظر الملحق ج).

والطريقة الكيميائية الحرارية الرئيسة هي التحلل الحراري (Pyrolysis) وهي طريقة تقوم بتكسير المركبات العضوية مثل الكربوهيدرات والسيليلوز والليغنين إلى عناصرها من الكربون والهيدروجين والأكسجين. ويوصف التحلل الحراري بأنه التقطير الإتلافي «للمواد العضوية عندما تسخن إلى درجات عالية (فوق 600° درجة مئوية) في جو يفتقر جداً إلى الأكسجين لكي يحدث الاحتراق. وقد استخدم التحلل الحراري تاريخياً في أفران الخشب لصنع فحم الخشب وليس لاستخراج غاز الوقود. وما زالت أفران فحم الخشب تستخدم حتى اليوم في الأقطار النامية غير أن التحلل الحراري لم يستخدم لإنتاج الغازات حتى زمن متأخر.

وتشابه طرق المعالجة والمنتجات الغازية للتحلل الحراري عند استخدام مواد التغذية من الكتلة الحيوية تلك المستخلصة من الفحم في عملية مشابهة (انظر الملحق ج عن أنواع الوقود التركيبي المشتق من الفحم). ويكون الكوك في تلك الحالة المنتوج الصلب وغاز المدينة (Town Gas) أو الغاز المنتج (Producer Gas) هي المنتجات الغازية الممكنة. وتختلف منتجات التحلل الحراري بصورة واسعة اعتماداً على درجة الحرارة المستخدمة مع المواد العضوية ومع وتيرة رفع درجة الحرارة فوق درجة 600 درجة مئوية. وإذا كانت مادة التغذية الخشب ورفعت درجة الحرارة من 600 إلى 1000 درجة بصورة تدريجية، فسنحصل على فحم الخشب – ذو القيمة الحرارية المقارنة بالفحم الحجري (22 – 28 مليون وحدة حرارية بريطانية/ للطن) – كما نحصل على غاز ذي قيمة حرارية واطئة إلى متوسطة (100 – 400 وحدة حرارية

بريطانية/ القدم المكعب القياسي). ويتألف هذا الغاز من مواد قابلة للاحتراق – أول أكسيد الكربون (CO) والهيدروجين (H_2) وكميات قليلة من الميثان (CH_4) – إضافة إلى ثاني أكسيد الكربون (CO_2) غير القابل للاحتراق وبخار الماء (H_2O). ولما كانت المنتجات الغازية للتحلل الحراري ذات قيم حرارية قليلة، يتحدد استخدامها في التسخين في الصناعة أو كمادة تغذية لعمليات التسييل ولا يمكنها التعويض عن الغاز الطبيعي للاستخدامات الأخرى.

والصنف الآخر من العمليات الكيميائية الحرارية هي عمليات التحويل إلى غاز (بدرجات حرارة مرتفعة). وتعمل محولات الغاز من الكتلة الحيوية كما في عملية التحلل الحراري على نفس أسس عمل محولات الفحم إلى غاز (هناك بحث موجز عن محولات الفحم إلى غاز في الملحق ج). ولكل من محولي الفحم والكتلة الحيوية إلى غاز منتجات غازية صرفة وكلاهما يستخدم عديداً من التفاعلات الكيميائية الحرارية نفسها. والمثال المعروف جيداً هو طريقة لورغي (Lurgy Process) التي ابتُكرت للفحم إنما يمكن استخدام مواد تغذية من الكتلة الحيوية فيها مثل نشارة الخشب. وتحدث تفاعلات البخار – الكربون والماء – الغاز المعروفة تاريخياً من معالجة الفحم في المفاعل في مناطق ذات درجات حرارة مختلفة عندما تندفع المادة المعالجة إلى أسفل المفاعل من القمة أو من الجانب (انظر الشكل 11-15).



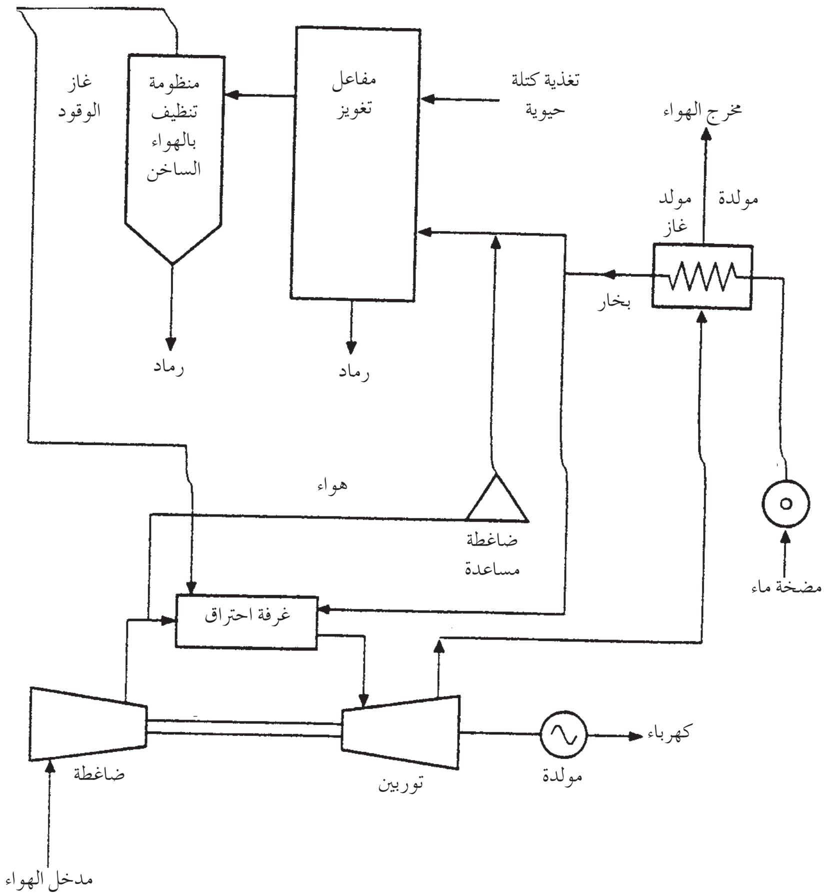
الشكل 11-15: مفاعل لورغي للتحويل إلى غاز.
مقتبس من: Johannson [et al.], 1993.

ومواد التغذية من الكتلة الحيوية أكثر فعالية من الفحم في طريقة لورغي للمعالجة وينتج منها تفاعل أكثر تكاملاً وأوقات معالجة أقصر. وتختلف منتجات التفاعلات الحرارية الكيميائية المختلفة بصورة واسعة باختلاف مواد التغذية ودرجات حرارة التفاعل ومازالت موضوعاً للبحث. فدور مكونات الليغنين في الخشب والمحاصيل الزراعية في العملية يجب أن يُفهم بطريقة أفضل لكي تستخدم جميع المكونات العضوية بصورة أفضل.

وقد كان هناك عدد من أجهزة التحويل الغازي البسيطة توفر الطاقة الحرارية فقط جرى إنشاؤها في الولايات المتحدة في العقود الأخيرة رغم أن العديد منها جرى التخلص منها. وكان هناك ما يربو على 3000 من أنظمة حرق الكتلة الحيوية هذه في الولايات المتحدة سنة 1989 وكلها ذات سِعات متواضعة للاستخدام الداخلي من قبل القطاع الصناعي. وكانت معظم هذه المنشآت في الجزء الجنوبي الشرقي من الولايات المتحدة واستخدمت الخشب كمادة تغذية. وتعمل أجهزة التحويل الغازي الحرارية التي تزود غازاً ذا محتوى حراري واطئاً/ متوسطاً في أماكن أخرى في العالم اليوم في الأقطار الصناعية (بلجيكا وفرنسا وفنلندا وإيطاليا والسويد) وفي الدول النامية (البرازيل والهند وإندونيسيا وتايلاند).

وهناك في الأقطار المتطورة مشاريع على مقياس واسع وأكثر تطوراً لاستغلال موارد الكتلة الحيوية. ويمكن مثلاً استخدام منتوج أجهزة التحويل الغازي من منتوج واطئ المحتوى الحراري في منشآت التوليد الكهربائي المزدوج عالية الكفاءة (انظر الفصل الثالث). وتدعى عملية التوليد المزدوج التي تستخدم تحويل غاز الكتلة الحيوية كمدخل بنظام «كتلة حيوية متكاملة مع محول غازي (مُغوّز)/ توربين غازي» (Biomass – Integrated – Gasifier/ Gas Turbine) أو BIG/ Gt للاختصار. ويكون الغاز الناتج في منشآة التحويل هو الوقود الذي يدخل إلى التوربين الغازي (انظر الشكل 11-16). وهذه المنشآت[9] تقع في مدى متوسط إلى كبير من السعات (50 – 250 نيغاواط كهرباء) الخاصة بأنظمة التوليد الكهربائية والقادرة على تزويد حاجة عشرات الآلاف من المنازل.

9ـ اكتمل التشغيل الناجح لنظام التوليد المزدوج الذي يستخدم الغاز التركيبي المشتق من الفحم للاحتراق في التوربين خلال الثمانينيات في مشروع كول ووتر في كاليفورنيا. وهذا المشروع هو مشروع متكامل لتوليد الغاز مع محطة =



الشكل 11-16: منظومة متكاملة لتحويل الكتلة الحيوية إلى غاز/ توربين غازي (BIG/GT)

المصدر: *Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity, T. B. Johannson [et al.]* ,Washington,DC.: Island Press, 1993.

وقد خطط لعلميات ريادية باستخدام أنظمة BIG/GT غير أن نتائج التشغيل غير متوافرة حتى الآن. وقد باشرت أقطار الاتحاد الأوروبي ببرنامج بحوث (مشروع THERMIE) للتحول من الفحم إلى التغذية بالكتلة الحيوية لمنشأة متكاملة. وهناك تفكير في البرازيل أيضاً حول مشروع BIG/GT باستخدام الخشب كمادة تغذية من

= توليد كهربائي مزدوج. وعندما كان الفحم وقود تغذية مولد الغاز كان المشروع يدعى (مولد الغاز من الفحم المتكامل/ التوربين الغازي) أو .CIG/GT وعند استخدام الكتلة الحيوية من أي نوع كوقود كان المشروع BIG/GT. والكفاءات الحرارية العالية للنظام المزدوج ذات فائدة في استحصال أفضل استخدام للتغذية بالكتلة الحيوية.

غابات مزروعة خصيصاً لهذا الغرض. وقد تقدمت تكنولوجيات التحويل الغازي للكتلة الحيوية بصورة عامة وبطريقة متميزة في العقد الأخير وهي تكنولوجيا واعدة كبديل للوقود الغازي من أصول أحفورية. وربما تجهز نسبة جيدة من حاجات الطاقة في العالم يوماً ما.

نحو التحول التجاري

إن التطوير الواسع المدى للوقود التركيبي من الكتلة الحيوية ـ سائل وغازي – أمر ممكن بوضوح، وهو أيضاً مرغوب نظراً إلى إمكانية تجدده وللأثر البيئي الخفيف الذي يتركه. غير أن التكنولوجيا لا تزال بعيدة من أن تكون تجارية أو للاستخدام الكثيف. والحقيقة أن أزمة طاقة جديدة سوف لا تكون كافية لتستحث الجهود لجعل الكتلة الحيوية مجدية بسرعة وعلى أسس واسعة القياس.

وبعض أسباب المشاكل تكنولوجية رغم وجود عدة خطط واعدة، إلا أن المسلك التقني الذي سيكون متفوقاً من حيث الكلفة والسلامة البيئية والموثوقية بعيدة المدى ليس واضحاً حتى الآن. ولا يمكن إثبات أي من هذه إلا بواسطة جهود التطوير وتحليل الأعمال على المقياس الكبير عبر فترة من الزمن. ويجب أن يتضح لدينا ما الذي سيعنيه الاستبدال الواسع للوقود الأحفوري بلغة الوسائل الإنتاجية المطلوبة. وإذا أردنا أن نفكر بصناعة قادرة مثلاً على التعويض عن نصف متطلبات وقود وسائط النقل، فسنحتاج إلى منشآت ذات حجم هائل قادرة على إنتاج ملايين الغالونات يومياً وفي كل يوم طوال السنة متوسعة كل سنة للّحاق بالطلب. وسنكون معتمدين على إنتاج الوقود التركيبي بالطريقة نفسها التي نعتمد بها الآن على الوقود الأحفوري ما لم تحدث تغيرات كبيرة في السلوك. لذا علينا التأكد من أن وسائل إنتاج مادة التغذية وكذلك وسائل تحويلها ستعمل بكفاءة وطريقة سليمة ولمدة طويلة وبتأثيرات بيئية مقبولة. وتبدو المؤشرات الآن أن هذه التأثيرات ستكون أقل من تأثيرات صناعة الوقود الأحفوري، رغم أن ذلك يجب أن يبرهن عملياً. وستكون هناك مثلاً حاجة إلى تحسينات في مواد ومعدات الإنتاج والذي لا يمكن اكتشافه إلا من خلال تجربة تشغيلية وإنتاج كثيف.

وعلينا أن نلاحظ وجود بعض المنشآت الواسعة للكتلة الحيوية يمكن أن توفّر

بعض الأدلة التشغيلية عن مشاكل الإنتاج الكثيف. فالبرازيل على وجه التخصيص أنتجت كميات كبيرة من الإيثانول من قصب السكر. غير أن منتوج الإيثانول البرازيلي لا يستطيع التنافس سعرياً مع البنزين كما إنه أثر على سعر السكر (للطعام) في عدد من المرات. ومن الواضح أن هناك حاجة إلى خبرة أكثر، مستخدمين أنواعاً مختلفة من المصادر وطرق المعالجة.

هناك أيضاً عدد من المشاكل تتعلق باستخدام الأرض. فمع توسع الطلب يجب أن تتوسع الأرض المخصصة للزراعة. وما زالت هناك حتى مع الأرض المتوافرة من المساحات غير المستغلة تماماً قضية موثوقية الأصول النباتية. فرغم أن محاصيل الطاقة ـ وبخاصة الخشب والحشائش والنباتات السيليلوزية – تحتاج إلى جهد أقل مما يبذل لزراعة الحبوب أو قصب السكر، إلا أنها مع ذلك منتجات زراعية. ويمكن نتيجة ذلك أن تؤثر الكوارث المناخية والحشرات والمشاكل الأخرى التي تواجه الإنتاج الزراعي في محاصيل الوقود أيضاً، تاركة إيانا بمشاكل أمن طاقة من نوع مختلف عمّا نواجهه مع الوقود الأحفوري، لكنها أيضاً مشاكل يمكن أن تؤدي إلى عوز وشدّة. وربما يكون الخزن ممكناً، كما يمكن تكديس الحصاد الوفير. غير أن استراتيجية من هذا النوع ستضيف إلى متطلبات السكان وإلى السعة التصنيعية وطبعاً إلى الكلفة.

الأكثر من ذلك، لا تسمح التكنولوجيا التي يجري تصورها الآن للوقود التركيبي السائل من الكتلة الحيوية بالانتقال جيئة وذهاباً من الإيثانول إلى البنزين للتعويض عن أي نقص. فالتحول إلى الوقود الكحولي يتطلب تصاميم خاصة للمحركات وتحويرات لمعالجة بدء التشغيل في المناخ البارد. وفي حين أن تطوير محركات جديدة لن يكون قضية لا يمكن تخطيها إلا أن أي جهد لم يُتخذ بهذا الخصوص حتى الآن.

وفي حين ما زالت هناك عوائق تكنولوجية يجب التغلب عليها إلا أن المشكلة الأكبر للوقود التركيبي من الكتلة الحيوية هي اقتصادية. ومن الصحيح أن تقدماً كبيراً قد أحرز نتيجة البحث والتطوير في الكتلة الحيوية عبر السنين القليلة الماضية إلا أن الباحثين ما زالوا يقدرون كلفة الإيثانول من مواد التغذية السيليلوزية بنحو 1.05 إلى

1.55 دولار لكل غالون. وهذا يمثل تحسناً في الكلفة بعامل يبلغ ثلاثة على تقدير الكلفة عند بدء البرنامج (يجب أن نلاحظ أن هذا تقديراً وحسب وليس كلفة إنتاج فعلية). وقد وضعت وزارة الطاقة هدفاً لبرنامج لتقليل إضافي للكلفة يصل إلى أقل من 0.70 دولار للغالون. وقد لا يمكن حتى عند هذا السعر للوقود المستخلص من الكتلة الحيوية أن ينافس البنزين التقليدي. فالسبعون سنتاً في البداية ليست إلا كلفة إنتاج وليست سعراً سوقياً وستجعل كلف النقل والتوزيع والتسويق وما إلى ذلك السعر أعلى. والشيء الثاني والأهم أن سعر البنزين من الوقود الأحفوري على الأقل في أواسط التسعينيات لا يزال أرخص. فسعر الجملة للبنزين كان معدله حوالى 60 سنتاً للغالون. وهذا السعر بالطبع يتذبذب ويتوقع أن يرتفع كلما استنفدت الاحتياطيات الأقل كلفة ولن يبقى إلا التجهيزات العالية السعر في السوق. غير أن السعر قد تصاعد ببطء جداً عبر العقد المنصرم منذ أواسط الثمانينيات حتى التسعينيات في حين أن تقليل كلفة الوقود التركيبي ليست إلا مشروعاً.

ومع ذلك قد تكون كلفة التطوير ذاتها ببساطة أكبر العقد. فالحكومة، وإلى حد ما، الصناعة يدعمان البحث والتطوير والمشاريع الريادية مثل BIG/GT واستمرارية هذه الدعم أمر سياسي إلى حد ما رغم أن التحرك نحو القطاع التجاري يعتمد بلا شك على استمرارية برنامج التطوير. إنما متى سيحدث التحول إلى الاستخدام الكثيف؟ سيتضمن ذلك بناء مئات من المنشآت ـ زراعية ومنشآت تحويل ـ واستثمار كلي يبلغ مئات المليارات من الدولارات. ولا يتوقع أن تكون الحكومة مصدرها (مع أخذ الحقائق السياسية الحالية بالاعتبار) حتى إذا بدا أن التوقعات التجارية كانت زاهية. وربما تأتي من القطاع الخاص مع بعض المحفزات الحكومية غير أن هذا لن يحدث إلا إذا كانت توقعات السوق مؤكدة. ويمكن أن يعني هذا أن جهود التطوير نحو كثافة الاستخدام تجارياً ستتحرك ببطء عبر السنين حتى عندما ترتفع أسعار الوقود الأحفوري وتصبح أسعار الوقود التركيبي مقاربة له. وذلك بالرغم من الصعوبات الاقتصادية التي قد يسببها سعر النفط المرتفع.

ولا يتوقع وجود مشكلة لدى المستهلكين حول تقبل الوقود التركيبي عندما يصبح هذا الوقود النموذج المعياري. وإذا ما كانت أنواعه بدائل مباشرة لأنواع الوقود الأخرى فلن يتطلب الأمر من المستهلكين أي تكيف مع تكنولوجيا جديدة. ولن

يشكّل مثل هذا الأمر عقبة نحو التحول التجاري ـ وهو أمر بدا بوضوح في حالة المجمّعات الشمسية ـ غير أن هذا لا يعني أن التحول التجاري يمكن أن يحدث سريعاً. ويتوقع للوقود التركيبي من الكتلة الحيوية مستقبلاً باهراً ويبدو على أنه الخيار المفضل عند نقطة ما في المستقبل غير أنه لا يظهر كأمر متوقع للاستخدام الكثيف على المدى القريب.

مفاعلات الاندماج النووي لتوليد القدرة

لقد قيل إن الاندماج النووي يمثل ذروة في تكنولوجيا الطاقة في العديد من الطرق. فهو المثال الأول لتكنولوجيا القيمة الدنيا الثابتة (انظر Nordhaus 1979، في مراجع الفصل العاشر) في حقيقة أن وقوده متوافر بصورة واسعة[10]. ويمكن للوقود الاندماجي أن يحل محل الوقود الأحفوري عندما يُستنزف، علماً أنه أي الوقود الاندماجي لن يستنفد أبداً. والاندماج تكنولوجيا نظيفة لأنها لا تنفث كميات كبيرة من المخلفات الصلبة أو الغازية ونواتجها العرضية النووية أقل خطورة من منتجات التكنولوجيات الانشطارية. وقد أصبحت تمثل الجهد الأكبر في البحث والتطوير على المدى البعيد لتكنولوجيا تحويل الطاقة بسبب إمكاناتها الكامنة الهائلة. وقد كانت في الحقيقة واحدة من أكبر الالتزامات على المستوى العالمي نحو التطوير العلمي للاستخدامات المدنية عبر القرن الماضي.

الأسس الفيزيائية

التفاعلات النووية هي مصدر للطاقة المتحررة عند الطرفين القصيين لمقياس الكتلة النووية في الجدول الدوري. ففي النهاية العليا (الوزن الذري < 200) لدينا تفاعلات الانشطار النووي لنظائر اليورانيوم والثوريوم. أما تفاعلات الاندماج النووي فتحدث على العكس في نظائر الهيدروجين والهيليوم.

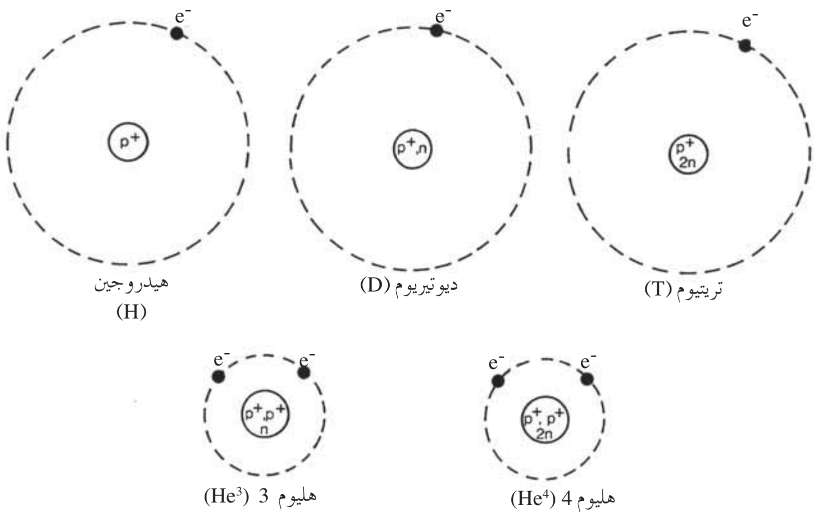
قد يبدو لأول وهلة من المتناقضات أن فلق النوى يؤدي إلى تحرير طاقة في حالة مفاعلات الانشطار وأن دمجها سوية في تفاعلات الاندماج يؤدي أيضاً إلى تحرير طاقة. إن التفسير الكامل لهذا التناقض وسبب حدوث هذه التفاعلات على نهايتي

10 ـ إن وقود الاندماج النووي هو نظائر الهيدروجين والهيليوم. يعبّر الديوتيريوم وهو نظير للهيدروجين العنصر الأساسي. وهو يتواجد بصورة طبيعية في العالم. فذرة من بين 6500 في مياه البحار هي ذرة ديوتيريوم.

مقياس الكتلة النووي يكمن في نظرية القوى النووية الرابطة (Sproull, 1963). ونستطيع أن نفهم مخرجات التفاعلات في كل حالة من ناحية ثانية كنتيجة لتساوي الكتلة والطاقة – معادلة الفيزياء الحديثة المشهورة ($E = mc_2$) التي واجهتنا في ما سبق في هذه النصوص.

وقد رأينا عند النظر في تكافؤ الكتلة ـ الطاقة (الفصل السابع) لتفاعلات الانشطار النووي أن مجمل كتلة منتجات الانشطار أقل من مجموع كتل نواة U235 والنيوترونات التي أنتجتها. وبطريقة مشابهة نجد أن مجموع كتل نظير الهيليوم ومنتجات الاندماج من نيوترونات أقل من كتلة نواتي الديوتيريوم[11] التي نشأت عنها في تفاعل اندماجي. ويتمثل الفرق بين تفاعلات الانشطار والاندماج كطاقة حركية عالية السرعة.

وقد نظر الفيزيائيون في أربعة تفاعلات اندماج نووي مختلفة ممكنة كأساس لمفاعلات القدرة الاندماجية المستقبلية (انظر الشكل 11-17).



الشكل 11-17 : تمثيل تخطيطي لنظائر الهدروجين. نظائر الهيدروجين وتفاعلات الاندماج الممكنة

تفاعلات اندماج الجيل الأول (DT)

$T \geq 4keV$ أو $40 \times 10^6 °C$ ،$D + T \longrightarrow \alpha + n + 17.6$

تفاعلات اندماج الجيل الثاني (DD)

$D + D \longrightarrow T + P + 4.03$ Mev;

$D + D \longrightarrow He^3 + n + 3.27$ Mev

تفاعلات اندماج الجيل الثالث (DD)

$T \geq 100$ keV, $10^9 °C$; $D + He^3 \longrightarrow \alpha + P + 18.3$ Mev

مقتبسة من Penner and Icerman 1975

وتظهر الطاقة المحررة لكل من التفاعلات الأربعة في الطرف الأيمن من معادلة التفاعل بملايين الإلكترون فولت (MeV). ويندمج الديوتيريوم (D) مع التريتيوم (T)[12] من التفاعل الأول لينجم عن ذلك نواة نظير الهيليوم ($^{4}_{2}He$ أو جسيمة ألفا) ونيوترون (n) ويطلق كل تفاعل من هذا النوع أيضاً MeV 17.6 من الطاقة (انظر التعليق على الشكل 11-17). ومن ناحية أخرى يمكن لتفاعل نواتي ديوتيريوم أن يعطي إما نواة تريتيوم وبروتون (P) زائداً 4.03 MeV من الطاقة أو نواة $^{3}_{2}He$ ونيوترون زائداً 3.27 MeV من الطاقة. وأخيراً يتفاعل الديتويريوم $^{3}_{2}He$، ليعطي $^{4}_{2}He$ وبروتون زائداً 18.3 MeV من الطاقة.

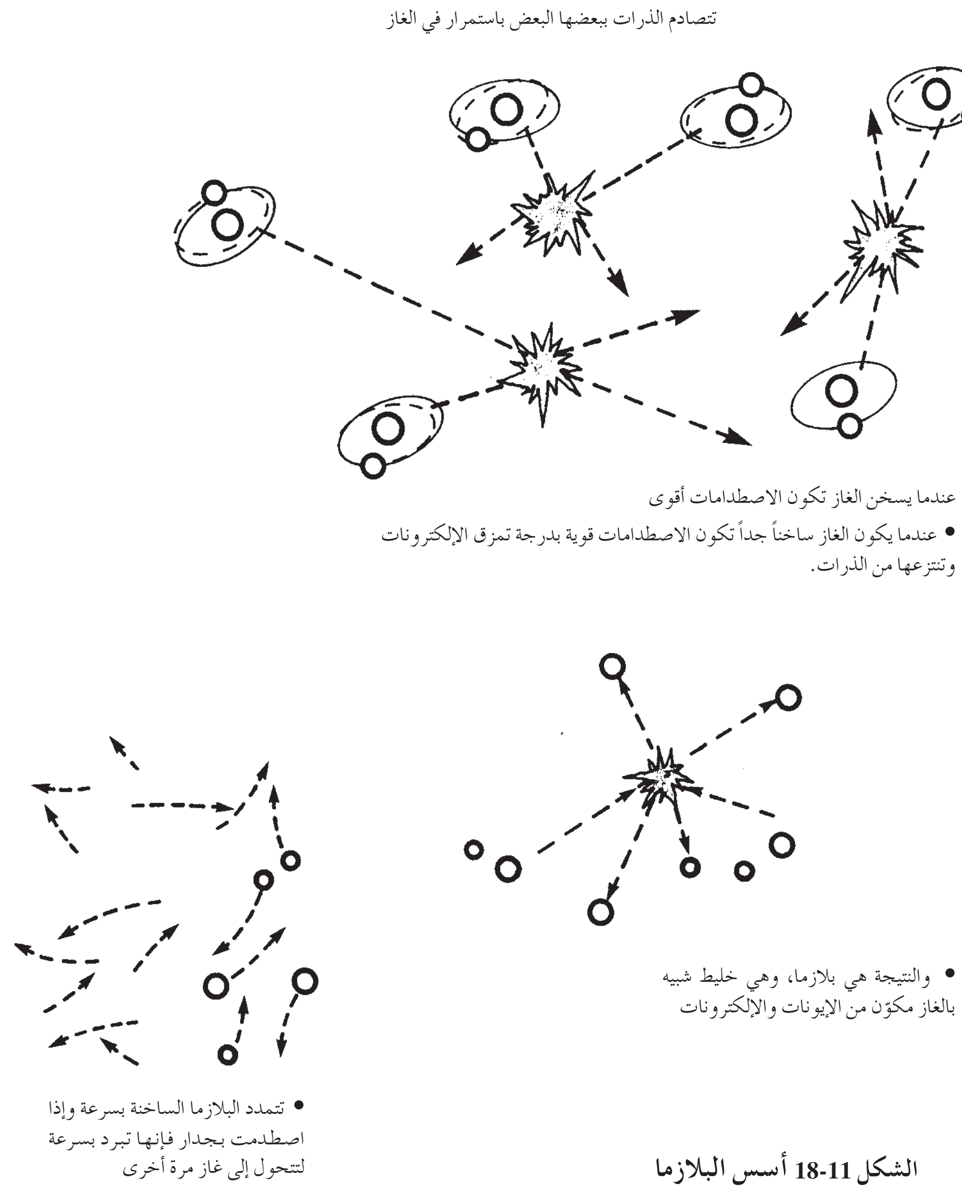
وتحدث تفاعلات الاندماج فقط عندما تتقارب بكفاية النوى الخفيفة (ضمن مسافة 10^{-15} متر). والطريقة الرئيسة الوحيدة لتقاربها إلى هذه الدرجة هي عند اصطدامها بسرعات عالية. وبخلافه تبقيها القوة الطاردة ضمن النوى (والنوى المعزولة هي أيونات ذات شحنة موجبة) متباعدة الواحدة عن الأخرى. والطاقة الحركية المطلوبة لتجاوز هذه القوى الطاردة الإلكتروستاتية مبينة في الشكل 11-17 بوحدات KeV (آلاف إلكترون فولت) أو بدرجة الحرارة المساوية (انظر الملحق أ).

إن إحداث تفاعل اندماج نووي والحفاظ عليه مسألة مختلفة جذرياً عن قضية تفاعل الانشطار. فتفاعل الاندماج ليس تفاعلاً تسلسلياً ولا يعتمد على النيوترونات وطاقتها لبدئه. بدل ذلك يحتاج تفاعل الاندماج إلى تسخين المكونات من النظائر في هيئة غازية إلى درجات حرارة فائقة الارتفاع كي تحدث اصطدامات عالية الطاقة للنوى القابلة للاندماج. ولهذا السبب تدعى هذه الأنواع من التفاعلات بالحرارية النووية.

ويؤشّر الشكل 11-18 إلى طبيعة الغاز عندما يسخن. ويبين أن زيادة الاصطدامات بين الذرات المحايدة تصبح ذات طاقة كافية لنزع الإلكترونات عن النوى عندما تزداد درجة حرارة الغاز مما ينتج منه غاز يتألف من إلكترونات مشحونة سالباً وعدد مساوٍ من النوى ذات الشحنة الموجبة (أيونات). هذا الغاز الذي يمتلك شحنة صفرية على مجمل حجمه يسمى البلازما. وتكِرس معظم جهود البحث عن الاندماج في ديناميكيات البلازما هذه.

---

12 - التريتيوم $^{3}_{1}H$ أو T هو النظير الثالث للهيدروجين ويتألف من إلكترون وبروتون ونيوترون (انظر الشكل 17.11).



الشكل 11-18 أسس البلازما

المصدر: U.S. Energy Research and Development Administration (1976).

وعندما يسخن غاز نظائر الهيدروجين يحدث التأين في درجات حرارة بحدود 100000 مئوية أو ما يعادلها عندما يبلغ معدل السرعة الحرارية ما يربو على مليون متر في الثانية. ويجب أن ترتفع درجة حرارة الغاز إلى ما يربو على مئة مليون درجة لكي

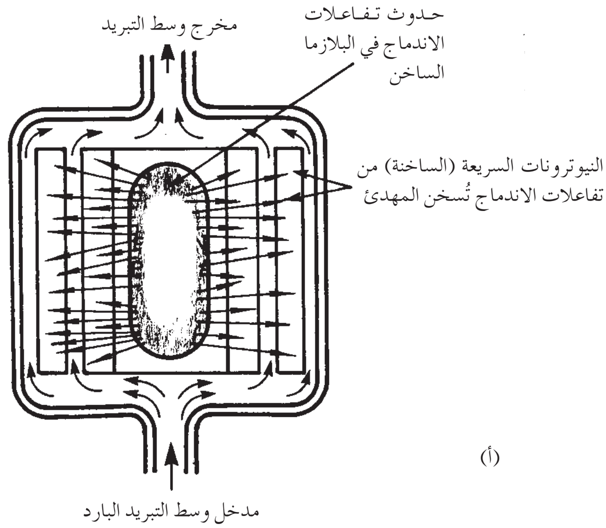
تحصل على تفاعلات الاندماج من اصطدام الأيونات وهي درجة حرارة تتوافق مع سرعة حرارية تبلغ نحو عُشْر سرعة الضوء (300 مليون متر في الثانية). وتحدث درجات الحرارة هذه حالات شمسية شبيهة ولا يمكن لمادة عادية أن تحتوي الغاز في هذه الحالة.

دعنا على أي حال نفترض أن الاحتواء ممكن وتصور مفاعلاً اندماجياً مثالياً. يجب أن يوفِّر مفاعل الاندماج المثالي طريقة لتحويل الطاقة الحرارية المولدة بالتفاعلات النووية في البلازما المحتبسة إلى توربين أو إلى أي وسيلة أخرى لتحويلها إلى شغل مفيد. ويمكننا أن نرى هذا المفهوم المثالي في الجزء العلوي من الشكل 11-19. هنا يتم «احتجاز» بلازما الاندماج في حين يتوقف المبرِّد حولها آخذاً الحرارة لاستغلالها في شغل مفيد. وبعبارة أخرى سيكون مفاعل الاندماج النووي شبيهاً بمفاعل الانشطار النووي في وجهة واحدة: إنه طريقة أخرى شديدة الغرابة جداً لغلي الماء. ورغم عدم التمكن من التوصل إلى هذا الوضع النموذجي إلا أننا عملياً نقترب من احتواء البلازما ونسمح لتفاعلات الاندماج المسيطر عليها بالحدوث. وعلينا أن نؤكد في البداية أن السعي إلى الوصول إلى التفاعلات الاندماجية المسيطر عليها (CTR) مازال في درجة بعيدة في مرحلة البحوث. وعلى تكنولوجيا المفاعل الاندماجي الناجمة أن تجد حلولاً لثلاث مشاكل: يجب أن تكون الحرارة مرتفعة بدرجة تسمح بحدوث اصطدامات الطاقة العالية، ويجب احتواء البلازما لمدة كافية تتيح للتفاعلات النووية تسخين البلازما لتحدث تفاعلات أخرى، ويجب أن تكون البلازما كثيفة إلى الدرجة التي تتيح للتفاعلات الحدوث للتغلب على وتيرة فقدان الطاقة إلى الخارج.

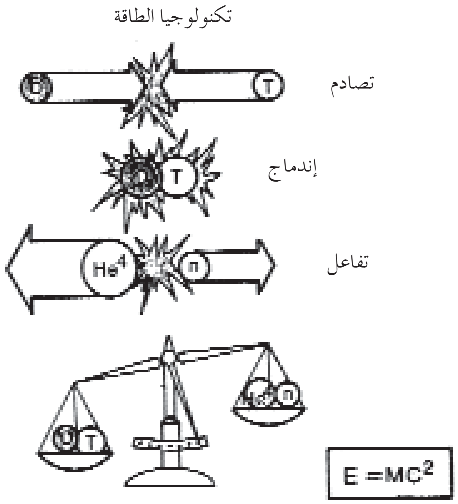
بحوث الاندماج

الهدف العلمي الأول لبرامج بحوث الاندماج في العالم هو تحقيق حالة التعادل. والتعادل هو النقطة التي تكون فيها الطاقة المنتجة من تفاعل الاندماج معادلة لمدخول الطاقة المطلوبة لإحداث التفاعلات. والطاقة المطلوبة كمدخل هي المقدار الضروري لحبس وتسخين البلازما إلى حالة الاندماج. وإذا كان بالإمكان الحصول على حالة التعادل فالهدف التالي هو الكسب الصافي للطاقة أي حيث تكون الطاقة المولدة بتفاعلات الاندماج أكثر من تلك التي استثمرت في بدء التفاعلات. وتدعى هذه الحالة بالاتقاد (Ignition) وذلك يتضمن حدوث اشتعال حراري نووي بطريقة

مماثلة للاحتراق. ولا يمكن تطوير مفاعل اندماجي على أسس هندسية ويجري عرضه للاستخدام التجاري إلا بعد بلوغ مرحلة الاتقاد.



(أ)



(ب)

الشكل 11-19 : أسس الاندماج النووي

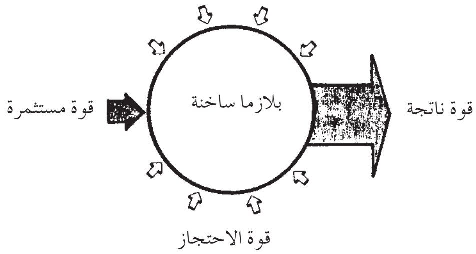
(أ) احتواء بلازما الاندماج

(ب) تفاعلات الاندماج النووي

المصدر: U.S. Energy Research and Development Administration (1976).

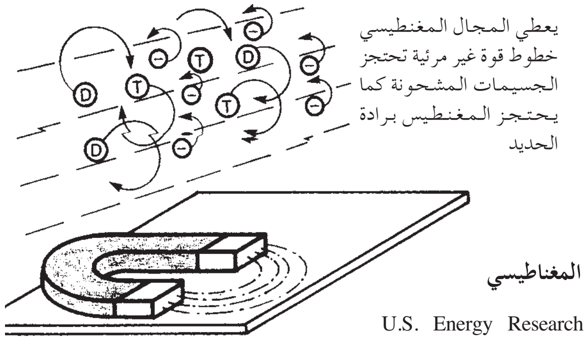
احتواء البلازما

كانت كيفية احتواء البلازما واحدة من أشد المسائل العصيبة التي ترتَّب على الباحثين إيجاد حل لها، وذلك لعدم وجود مادة معروفة يمكن أن تستخدم كوعاء احتواء تتمكن من الصمود أمام درجات الحرارة الشمسية للبلازما. وقد جرى التفكير باحتواء البلازما بطريقتين رئيستين: الاحتواء المغنطيسي والثانية الاحتواء بواسطة تأثير القصور الذاتي. وسنركز في هذا الفصل على الطريقة الأولى لأنها تمثل الجهد الرئيس في بحوث الاندماج اليوم وسنبحث في الاحتواء بالقصور الذاتي بصورة مختصرة في الملحق ج. يستفيد الاحتواء المغنطيسي من خاصية معروفة جيداً عن المجالات المغنطيسية (الشكل 11-20). فهذه المجالات تحرف حركة الجسيمات المشحونة التي توجه عبر خطوط القوة بحيث تميل هذه الجسيمات إلى اتخاذ مسار لولبي أو حركة دوامية حول خطوط القوة (انظر الشكل 11-20).



Tion > 5 Kev (50000000°)

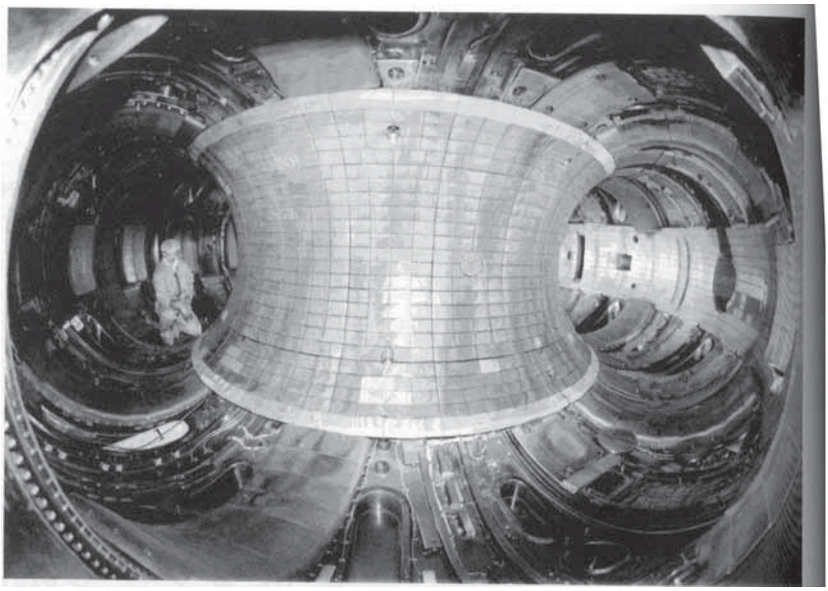
nt > 5 x 10^{13} cm^{-9} Seconds



الشكل 11-20: **أسس الاحتجاز المغناطيسي**

المصدر: U.S. Energy Research and Development Administration (1976).

والشكل الرائد لتصميم الاحتواء المغنطيسي هو (توكاماك)[13] والذي يبين الشكل (21-11) مثالاً له. ويجري في هذا التصميم احتواء البلازما بشكل حلقي بواسطة مجالات مغنطيسية. وتُنشأ هذه المجالات بواسطة سلسلة من الملفات وضعت حول حلقة البلازما (انظر الشكل 11-22 عن ملفات مغنطيس المجال الحلقي). وتتركز خطوط القوة المغنطيسية مع حلقة البلازما متابعة قطرها الكبير.



الشكل 11-21: منظر داخل مفاعل توكاماك الاندماجي الاختباري يبين الوعاء الفراغي.

هذا المفاعل موجود في مختبر فيزياء البلازما في جامعة برنستون في نيوجرسي. ويبدو في الوسط وعلى الجدار الداخلي للوعاء محدد الصدمات المؤلف من الغرافيت والبلاط الغرافيتي المدمج. ويمكن رؤية البلاط الغرافيتي الذي يقي الوعاء من الحزم الشعاعية المتعادلة إلى اليمين على الجزء الوسطي من الجدار الخارجي للحجرة. كما تظهر صفوف من بلاط الغرافيت بوضوح عند قمة وقعر الوعاء. وتبدو في الصورة أيضاً مطلقات أيونات السايكلوترون بالتردد الراديوي على يسار الوعاء الفراغي قرب كتف الشخص الجاثي.

وتقوم المجالات المغنطيسية الحلقية للتوكاماك بحرف (وبذلك حصر) أي حركة شعاعية للإلكترونات أو الأيونات لتخرج من الحلقة. وبذلك يجري التغلب على قوى

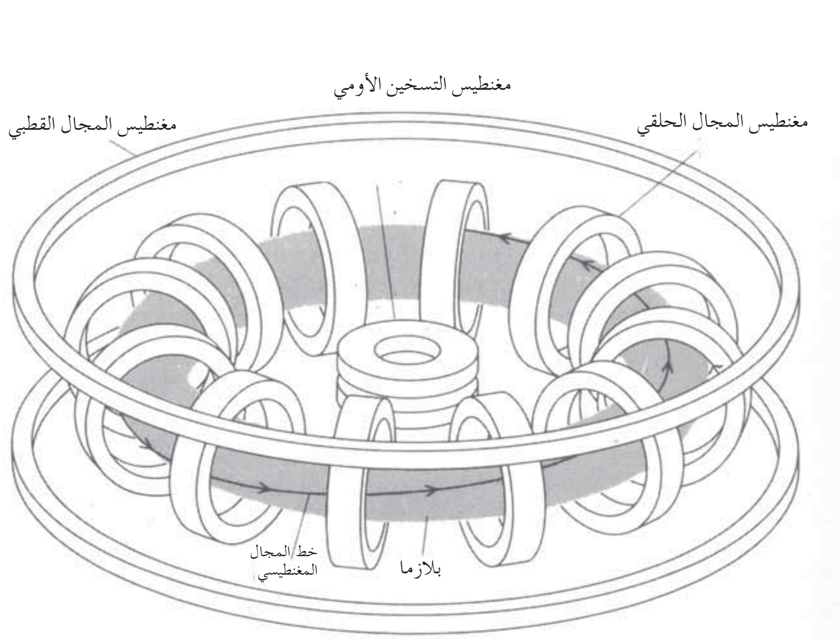
13 ـ تسمية توكاماك (Tokamak) هي الأحرف الأولى من كلمات روسية. وكان الروس قد نجحوا في عرض احتواء ناجح في تجربة قام بها أرتسيموفيتش في الاتحاد السوفياتي عام 1970.

التمدد الطبيعية للبلازما الساخنة. ويجب المحافظة على هذا المجال الحاجز لدعم التفاعلات الاندماجية. إن القوى الهائلة لبلازما الاندماج عند درجات حرارة الاتقاد تجعل الاحتواء المستمر تحدياً هندسياً رئيسياً، وهو ما سنبحثه في هذا الفصل لاحقاً.

والاحتواء المغنطيسي لا يمكن أن يكون متكاملاً عملياً بسبب العمليات الفيزيائية كالانتشار داخل البلازما. والانتشار عملية طبيعية في أي كتلة من الجسيمات تتحرك حرارياً. ورغم أن المجال المغنطيسي يستطيع أن يحتوي الجسيمات سريعة الحركة إلا أنه غير فاعل في إزاحة عشوائية لجسيمة كي يجعلها تتوقف لحظوياً نتيجة اصطدام حراري. نتيجة ذلك يصبح هدف الاحتواء المغنطيسي ببساطة، عند مواجهة الانتشار والخسارات الأخرى، إدامة كثافة البلازما لفترة زمنية كافية لحدوث الاندماج. الحل البديل لإدامة كثافة البلازما هو تزويد وقود جديد إلى المفاعل بصورة مستمرة.

والمهمة الرئيسة الأخرى في بحوث الاندماج بعد الاحتواء هي تسخين البلازما. والطريقة الرئيسة في مفاعل توكاماك هي أن يجري احتثاث تيار كهربائي قوي خلال البلازما وذلك يسبب خسارة كهربائية تقوم بدورها بتسخين الغاز، ونوع التسخين يدعى بالتسخين الأومي (Ohmic Heating) وقد دُعي بهذه التسمية نسبة إلى وحدة المقاومة الكهربائية (الأوم). ويجري احتثاث مغنطيسي في حلقة البلازما يشابه ما يحدث في المحول الكهربائي للتيار المتناوب (انظر الملحق أ). واللفات الأولية للملف الابتدائي للتسخين الأومي تتطابق مع حلقة البلازما (الشكل 11-22).

ويستخدم التوكاماك مفهوماً آخر مقتبساً من محول التيار المتناوب. عندما يكون هناك ملف ثانوي مقترن بواسطة المجال المغنطيسي مع الملف الأولي سيجري احتثاث تيار في الملف الثانوي. وإذا ما كان للملف الثانوي لفّات أقل من الأولي فستكون الفولتية المحتثة أقل إنما سيكون التيار أكبر. وحلقة البلازما في الحقيقة هي ملف أحادي اللفّة في حين أن الملف الأولي (التسخين الأومي) مصمم بنمو 10 إلى 20 لفّة. وعندما يدفع ما بين 50000 و100000 أمبير خلال الملف الأولي يمكن أن يكون هناك تيار يبلغ نحو مليون أمبير أو أكثر محتثاً في الحلقة البلازمية.



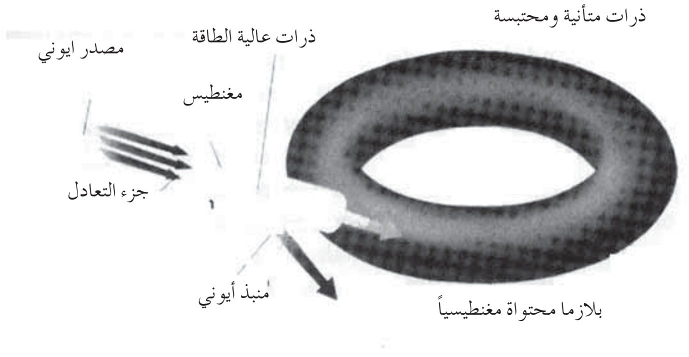
الشكل 11-22: توكاماك نموذجي

المصدر: Robert W. Conn. «The Engineering of Magnetic Fusion Reactors», Copyright © October 1983, Scientific American, Inc. All rights reserved Illustration Gabor Kiss.

والتسخين الأومي رغم قوته الظاهرية يبدو غير كافٍ للوصول إلى حرارة الاتقاد في التوكاماك. وقد بُذلت جهود لتوفير تسخين إضافي. وأحد وسائل التسخين الإضافي هي من خلال حقن حزمة من أشعة ذرات نظير الهيدروجين المتعادل عالي الطاقة في حلقة البلازما (الشكل 11-23). ويجب أن تجري معادلة الجسيمات المحقونة ـ أي إنها لا تمتلك شحنة موجبة أو سالبة ـ لكي لا تخضع للانحراف بواسطة المجال المغنطيسي القوي في توكاماك. وما إن تدخل الذرات المحقونة في البلازما حتى تبدأ الاصطدام بجسيمات البلازما وتصبح مكونات آيونية للبلازما وتضاف إلى طاقتها الحرارية.

بالإمكان أيضاً تحقيق حرارة إضافية بواسطة تشعيع البلازما بموجات راديوية أو مايكروفية عالية القوة بنفس طريقة فرن المايكرويف إلى حد ما. وتدعى هذه الطريقة بالتسخين بواسطة التردد الراديوي (Radio Frequency Heating) أو rf ويعتقد أنها تعمل بصورة جيدة خصوصاً عندما يكون تردد الموجات القادمة قريبة من واحدة من

الترددات المتوافقة طبيعياً مع البلازما الممغنطة. وأحد هذه الترددات التوافقية هو تردد السايكلوترون وهي الوتيرة الطبيعية للحركة الدوامية للإلكترونات حول المجال المغنطيسي.



الشكل 11-23: مفهوم حزمة الأشعة المتعادلة. بسماح من Princeton Plasma Physics Laboratory

كما واجه الفيزيائيون إضافة إلى احتواء وسخونة البلازما تحدي السيطرة على البلازما ضد عدم الاستقرارية. وهناك حالة متأصلة للبلازما الساخنة وهي عدم الاستقرارية إذ يمكنها أن تنقسم إلى حركة عنيفة ذات أنواع عديدة بما في ذلك حركات تموج قوية وما يدعى بعدم الاستقرارية الهيدروديناميكية المغنطيسية – (Magnetohydrodynamic Instability) أو (MHD). وتتصف حالات السيطرة على البلازما بالدقة الفائقة بحيث شبَّه بعض الباحثين في البلازما مشاكلها بمحاولة تعليق الماء في قنينة مقلوبة رأساً على عقب، فيما قال آخرون أن عليهم السيطرة على هلام نجمي. وعدم الاستقرارية من نوع MHD الذي يعني أن جسم البلازما برمته يلتوي وينحني أو ينتفخ بتأثير القوى المغنطيسية والسائلة مجتمعة كانت من بين الالتواء والانحناء والانتفاخ بالتأثر المزدوج للقوتين المغنطيسية والمائعة كانت واحدة من أولى المشاكل التي واجهها الباحثون في البلازما. وقد وجدوا أن نتائجها لا يمكن فقط أن تؤدي إلى تقلبات غير مرغوبة وإنما تحطم البلازما برمتها.

ومع ذلك فقد وجد أن إضافة المجال المغنطيسي القطبي يميل إلى تثبيت بلازما التوكاماك ضد مثل هذه التحركات. وتستحدث المجالات القطبية بواسطة مجموعة منفصلة من الملفات المغنطيسية (انظر الشكلين 11-21 و11-22) المجالات القطبية الناجمة هي مجموعة من الحلقات ذات مراكز متطابقة تقريباً مع الملفات الحلقية

الأصلية. وهي تتقاطع مع المجالات الحلقية وتعطي مجتمعة خطوط مجال مدمجة شاملة تلتف بصورة حلزونية حول حلقة البلازما، كما يبيّنه الشكل 11-22. وتحمل لفات المجال القطبي تياراً مستقراً (تيار مستمر .d.c أو نبضات طويلة مستقرة) لتولد مجالاً مغنطيسياً مؤازراً مع المجال الحلقي.

إن إضافة المجال القطبي سيوجِد على المجال المجهري حركة للإلكترونات والأيونات تتبع مسارات حلزونية حول خطوط المجال المغنطيسي الحلزونية (للمجالين الحلقي والقطبي المدمجين). ويميل كل من نوعي المجال المغنطيسي مع ذلك إلى حصر الجسيمات المشحونة لأن حركتها نحو حدود الحلقة سترتد بتأثير المجالين.

وقد اقترح باحثو الاندماج النووي وجربوا بدائل مختلفة للاحتواء المغنطيسي للتوكاماك. ورغم أن خطة التوكاماك تبقى المدعي المتقدم للمفاعل الاندماجي إلا أن القرصات المغنطيسية (Magnetic Pinches) والمرايا المغنطيسية قد جربت أيضاً. ويجري في القرصة المغنطيسية ضغط البلازما حجماً بواسطة الزيادة السريعة للمجال المغنطيسي المحيط بها. والقرصة التي تزيد كثافة البلازما وتسخنها يمكن أن تستخدم في عدة أنواع مختلفة من الأوضاع الهندسية. أما المرآة فهي من ناحية ثانية هيئة لمجال مغنطيسي يمكن أن تسبب ارتداد مسارات الجسيمات على ذاتها موفِّرة طريقة لحصر عمود مستقيم من البلازما. وتسبب المجالات القطبية في التوكاماك أيضاً مسارات تقفل على نفسها وهذا ما يساهم في استقرارية الاحتواء بذلك الشكل.

ورغم أن هذه المفاهيم البديلة ليست واعدة بصورة شاملة مثل التوكاماك، إلا أنها قد استغلت في السنين الأخيرة لمساعدة الباحثين في الإمساك بالأوضاع المطلوبة لتحقيق التعادل. ومع ذلك فقد كان هناك حس تنافسي بين مشاريع الاحتواء البديلة وبين مشروع التوكاماك الرئيسي. ولم يثبط المشرفون على البحوث في وزارة الطاقة العامل التنافسي لأنهم كانوا يعرفون أن البدائل يمكن أن تخدم كعامل تأمين ضد أي انهيار غير متوقع لمفهوم التوكاماك.

ويلخص الشكل 11-24 وضعاً لبحوث الاندماج في أوائل التسعينيات في مشروع توكاماك. وهناك ثلاثة معايير لمدى قرب أحوال البلازما الساخنة إلى تلك المطلوبة

لمُخرج صافي للطاقة من تفاعلات الاندماج وهي:

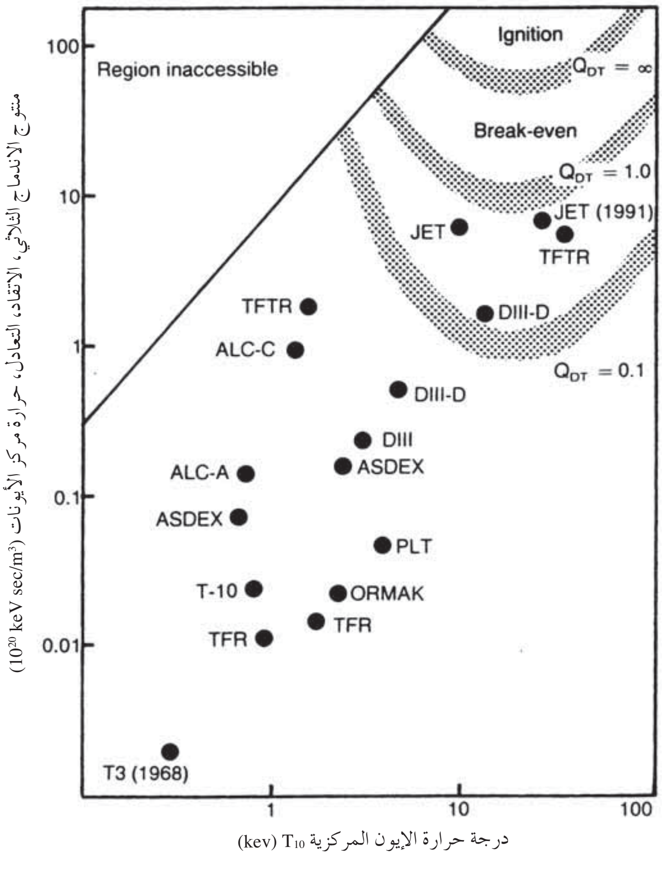
كثافة أيونات البلازما (n من الجسيمات في المتر المكعب).

زمن احتواء البلازما (τ ثانية)

الطاقة الحركية للأيونات (T, keV)

ولكي تحدث تفاعلات التعادل يجب أن يكون للبلازما توافق حدوده الدنيا هي الكثافة (n) وزمن الاحتواء (τ) والحرارة (T). ويعبر عن هذا الشكل بعنوان «المنتوج الثلاثي للاندماج» (nTτ) على المحور العمودي. ويشير المحور الأفقي إلى طاقة حركة الآيونات.

(درجة الحرارة في القلب المركزي للبلازما).



الشكل 11-24: **وضع بحوث اندماج التوكاماك عبر 25 سنة**

(انظر الجدول 11-1 لتشخيص التجارب المختلفة) مقتبس من: Physics Today, 1992.

الجدول 11-1 التجارب التي بيّنها الشكل 11-2

ALC – C	Alactor – C في مركز بلازما الاندماج MIT
ASDEX	تجربة الانحراف المتماثل محورياً. معهد ماكس بلانك، كارشينك، ألمانيا
D III	دوبلي III جنرال أتوميكس، سان دييغو
D III - D	دوبلي DIII جنرال أتوميكس، سان دييغو
JET	جوينت يوربيان تورس أبينغتون، المملكة المتحدة
ORMAK	توكاماك أوك رج، مختبر أوك رج الوطني
PLT	تورس الكبير في برنستون، مختبر بلازما الفيزياء، برنستون
T – 3	معهد كرشاتوڤ ـ موسكو
T - 10	معهد كرشاتوڤ ـ موسكو
TFR	مركز البحوث النووية – فرنسا
TFTR	مفاعل اختبار اندماج توكاماك، مختبر بلازما فيزياء برنستون

وتعطي درجة حرارة القلب في البلازما كمعيار منفصل لأنه المتطلب الأساسي لحدوث تفاعلات الاندماج النووي المفردة. ويمكن تتبع التقدم نحو التعادل والاتقاد في نتائج التجارب عندما تتحرك إلى زاوية اليد العليا اليمنى للرسم البياني.

وقد أحرز الباحثون، كما يبيّن الشكل، تقدماً عبر العقدين المنصرمين نحو التعادل. والحقيقة أنهم حسنوا مفاعلات مثل TFTR أو JET للوصول قريباً من أهداف هذه البحوث وهذان المفاعلان هما الأقرب إلى التعادل[14]. وقد وصل الناتج الثلاثي إلى $9x10^{20}$ تقريباً. وقد أحرز ذلك بعوامل مفردة في الحدود $n= 3.5 \times 10^{19}$ و $T = 25keV$ و $1 \approx \tau$ ثانية. وقد أنتج المفاعلان طاقة اندماجية مؤلفة من انفجارات تفوق 10 ميغاواط (قدرة حرارية) عندما تعبئا بالتريتيوم والديوتيريوم كوقود نووي. غير أن هذه النتائج احتاجت إلى نحو عشر مرات من مدخول تلك القدرة لإنجاز تفاعل الاندماج، لذا فهي بعيدة بمسافة كبيرة عن التعادل.

وإذا ما حصلنا على حالة التعادل في الجيل الحالي من توكاماك فالخطوة المنطقية التالية ستكون الحصول على الاتقاد فيه (أو في مفاعل متشعب منه). وعلى أي حال هناك أسئلة عن الاستراتيجية الواجب اتباعها للجيل التالي من تجارب الاندماج. فكما

14 ـ يجب أن نذكر أن التجارب السابقة كانت مخططة من غير توقع الوصول إلى التعادل. فبعضها ركز على الوصول إلى درجات حرارية أعلى، بينما ركزت غيرها على كثافة أعلى للبلازما.

لاحظنا في الفصل العاشر كانت مجموعة بحوث الاندماج (في الولايات المتحدة عالمياً) تناقش إذا ما كان يجب أن يكون البرنامج ذا توجه علمي أو ذا توجه تكنولوجي. أي هل يجب أن تركز الجهود على أسئلة علمية أساسية أم يجب أن يستمر الباحثون في تتبع مفاعل عامل. ورغم أن النقاش الحالي عن البحث والتطوير يجري في تعابير علمية وعلى أسس تقنية إلا أن الاهتمام بمستقبل التحويل وبمشكوكية نتيجة الجيل الحالي من البحوث تخيمان عليه. وتمثل الشكوك في نهاية الثمانينيات تغيراً متميزاً عن الخطط المنهجية المفعمة بالمتعة التي اقترحت في نهاية السبعينيات في تشريع ماك كورميك (انظر الفصل العاشر) ومن خلال مشروع مفاعل INTER دولياً[15].

وقد وضع كل من مشروعي ماك كورميك وINTER خطوات تؤدي إلى عرض مفاعل اندماج مع جهود متسقة للأوجه الهندسية يجب تنفيذها لمحطة مفاعل اندماج عامل. وكانت الأسبقية الأولى لهذه الجهود هي الوصول إلى مفاعل للعرض بعد حوالى عقدين. ومع تقليص التمويل الذي جرى سنة 1985 أصبحت الأهداف الجديدة هي الوصول إلى تجربة اتقاد ذات توجه علمي.

وقام الكونغرس سنة 1995 بإجراء تقليصات رئيسة في برامج الاندماج في وزارة الطاقة. وكانت هذه التقليصات شديدة إلى درجة أدت إلى إلغاء الجيل التالي من تجارب المفاعل في مختبر فيزياء البلازما في جامعة برنستون وهو المعهد الرئيس لبحوث الاندماج في الولايات المتحدة. والاحتمال الأكبر أن مشاريع مفاعلات الاندماج ستكون في المستقبل جهوداً تعاونية دولية مثل برنامج INTER. غير أن هذه المشاريع ستحتاج إلى الدعم من مختلف الأقطار الصناعية – وهو دعم غير مؤكد في أحسن الحالات. ومن المتوقع وجود تمويل حكومي متواضع بحيث يمكن إجراء بحوث أساسية على الخواص المراوغة للبلازما الساخنة (وهذا النوع من البحوث كان موضع طلب النقاد).

غير أن هذا يمثل تراجعاً إضافياً عن الأهداف المبرمجة العظمى لفترة السبعينيات التي يبدو أنها أهملت أخيراً وبصورة نهائية.

15 - INTER هي الأحرف الأولى من International Tokamak Reactor وهو مشروع مشترك بين الولايات المتحدة وأوروبا الغربية واليابان والاتحاد السوفياتي ينسق من خلال الوكالة الدولية للطاقة الذرية في فيينا.

الاندماج البارد

أعلن عالمان من جامعة يوتا سنة 1989 أنهما حققا اندماجاً نووياً بارداً في درجة حرارة الغرفة في وعاء مختبري عادي. واجتذبت التجربة التي سميت «الاندماج البارد» انتباهاً كبيراً لأنها إذا صحَّت ستعني قدرتنا على الاستفادة من مصادر الاندماج فائقة التوفر من دون الإجراءات والمشاكل غير الاعتيادية لبلازما درجات الحرارة النجمية. غير أن ادعاءات هذين الباحثين سرعان ما تحداها آخرون بشدة وبرهنوا على خطئها بصورة كبيرة.

تضمنت التجارب وضع أقطاب كهربائية من عنصر البالاديوم في وعاء مختبري يحوي «ماءً ثقيلاً» وتسليط جهد كهربائي عبرها (والماء الثقيل يتألف من D_2O بدل H_2O العادي حيث يحل نظير الديوتيريوم بدل الهيدروجين في الماء العادي). ويجري خلال هذا الترتيب امتصاص الديوتيريوم ويفترض أنه يخضع لتفاعلات نووية. وبينت التجربة ظواهر عديدة لنتائج الاندماج مثل وجود عناصر تعتبر نواتج للاندماج (مثل $^{3}_{1}He$) أو انبعاث نيوترونات عالية الطاقة (انظر التعليق على الشكل 11-17).

واعتمدت النظرية التي استند الاندماج البارد إليها على قابلية بعض المعادن مثل البالاديوم على امتصاص كميات كبيرة من الهيدروجين (أو نظائره) بين ذرات بنيتها البلورية. وقد افترض أن ذرات الديوتيريوم إذا ما حشد عدد كافٍ منها في بنية المعدن فإن نشاط الكم الميكانيكي على المستوى الذري سيؤدي إلى اندماج النوى (أي الاندماج النووي). وفي حين لم يقدم برهان حاسم على صحة أو خطأ هذه النظريات تحدى علماء آخرون ما لوحظ في تجارب يوتا. ولم تنجح عدة محاولات من قبل آخرين لتكرار الأوضاع الدقيقة للتجارب الأصلية ولم تنتج منها أي أدلة ذات معنى لتفاعلات الاندماج النووي في أوعية مختبرية بالماء الثقيل وأقطاب البالاديوم.

واتهم بعض النقاد في ما بعد التجارب الأصلية للاندماج البارد بكونها فاسدة منذ البدء إذ اعتمدت فيها تقنيات تجريبية صبيانية. واتهم آخرون بعدم الأمانة بصورة كلية، حتى إن أحد التحليلات دعاها «العلم المَرَضي» الذي يحدث بصورة منتظمة في تاريخ العلوم (Close, 1991) واضمحل الاهتمام بعد ذلك بالاندماج البارد، كما اختفى معظم التمويل لأي بحوث إضافية.

نحو التطوير: التحدي الهندسي

سيقتصر البرهان الذي تقدمه تجارب التعادل والاتقاد، إذا ما نجحت، على الإمكانية العلمية لمفاعل الاندماج. وسيكون هناك بعد ذلك مهمة هندسية هائلة لابتداع مفاعل يعمل بصورة آمنة وباعتمادية وبصورة اقتصادية ـ وعندئذٍ ستبتدئ مرحلة التطوير المذكورة في الفصل العاشر. كما إن بعض القضايا الهندسية التي يجب إيجاد حلول لها لم يجرِ في مرحلة البحوث الحالية حتى التطرق إليها. فلم يقم أحد مثلاً بأي عمل يخص الوقود الهيدروجيني. وقد نفذت تجارب الاندماج المغنطيسي حتى اليوم بالهيدروجين النقي وليس بنظائره القابلة للالتحام، لذا فإن قضايا توليد ومناولة التريتيوم المشع لا تزال تنتظر من يتحرى عنها أو يتابعها.

ويمثل الشكل 11-25 المدى الكامل للمتطلبات التكنولوجية لمفاعل اندماج نووي يعمل بالاحتواء المغنطيسي. وبإمكاننا أن ندرج التالي:

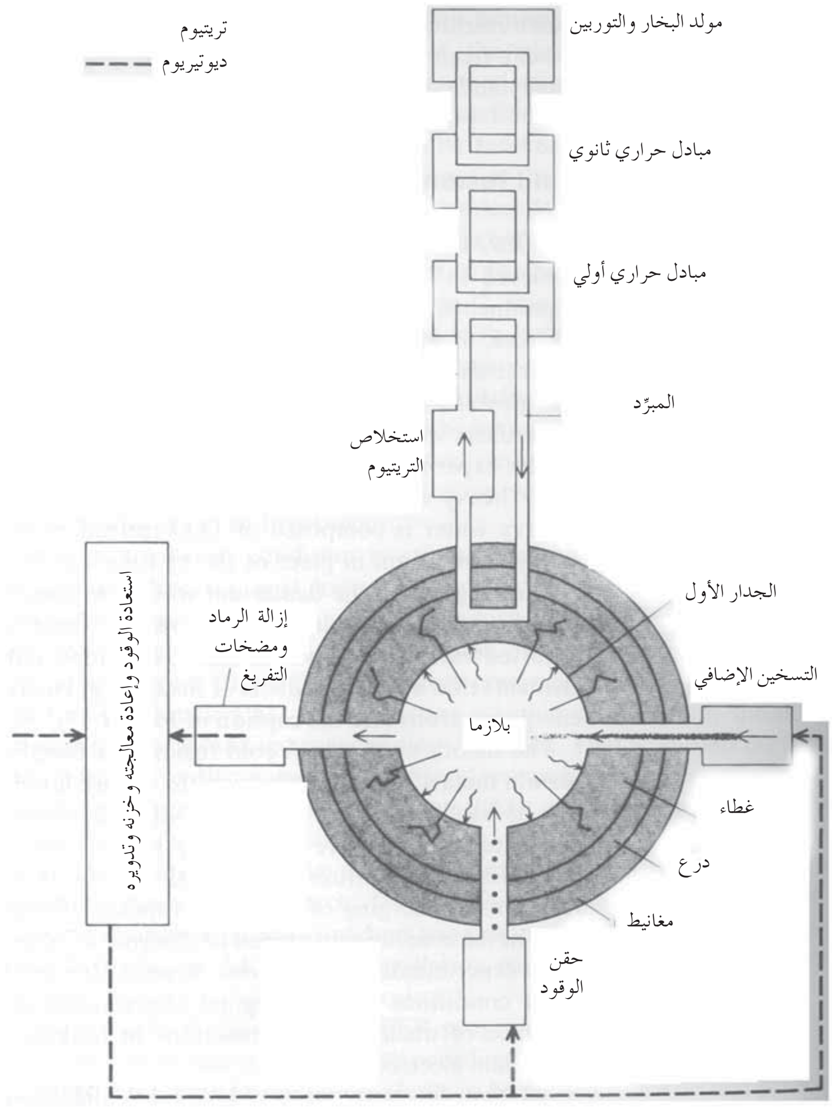
المجال المغناطيسي: يجب الحفاظ على مقدرات هائلة للمجال المغنطيسي تصل مثلاً إلى 50000 غاوس[16] وعلى أحجام كبيرة (تصل إلى 10000 متر مكعب). وهذا سيتطلب مغانيط فائقة التوصيل تحتاج إلى واحد في المئة على الأقل من ناتج القدرة المفيد للمفاعل للتشغيل.

إعادة تدوير الوقود: يجب تزويد المفاعل بالوقود عندما يحترق الديوتيريوم ويُفقد الوقود ويجب أيضاً تنقية تجهيز الديوتيريوم والتريتيوم لمتطلبات عناية فائقة.

توليد التريتيوم: وهذا ضروري لأن التريتيوم نادر في الطبيعة. ومن المتوقع تحقيق ذلك بوضع غطاء من الليثيوم السائل حول المفاعل – وسيولد القصف بنيوترونات الاندماج عالية الطاقة عند ذلك التريتيوم.

استخلاص ومناولة التريتيوم: وهذه معالجة دقيقة لأن التريتيوم مشع. ورغم أنه ذو

16 ـ غاوس هو مقياس لكثافة الفيض المغنطيسي. والمجال المغنطيسي الأرضي مجال ضعيف تترواح شدته بين 0.25 و0.55 غاوس عند خط الاستواء. وتبلغ شدة المجالات المغنطيسية التي نجدها في معدات القدرة الكهربائية الاعتيادية من نوع المحولات والمولدات نحو 10000 غاوس غير أن ذلك مطلوباً على أحجام صغيرة جداً ضمن الجهاز.



الشكل 11-25: المتطلبات التكنولوجية لمفاعل اندماج نووي

المصدر: «The Engineering of Magnetic Fusion Reactors,» Robert W. Conn. Copyright© October 1983, By

عمر قصير وأقل إهلاكاً من الوقود الانشطاري إلا أنه على أي حال يثير الهموم حول السلامة المهنية والسلامة العامة[17].

«الجدار الأول»: يجب أن يكون المفاعل قادراً على تحمل أوضاع فيزيائية قصوى من القصف النيوتروني وتجمع الحرارة. وستكون مفاعلات القدرة العاملة أكبر عدة مرات من الوحدات التجريبية الحالية وستكون كثافة الطاقة نتيجة لذلك كبيرة جداً وتضع ضغوطاً هائلة على المفاعل.

نقل الحرارة: يمثل تدوير المبرد مهمة هندسية رئيسية ويجب أن يكون ذا اعتمادية.

التدريع ضد الإشعاع والتخلص منه: هذا مطلوب ضد نيوترونات بقوة 18 ميغافولت من تفاعل DT الذي سيخترق في ما وراء (الغطاء) إلى بنية المفاعل. وهذا يحتاج إلى تطوير سبائك جديدة مقاومة للعطب من النيوترونات وتتطلب استعدادات مسبقة للتخلص منها.

تسخين البلازما: إن هندسية مصدر كفء لتسخين البلازما يعد مهمة رئيسة. إن التسخين الإضافي في توكاماك يعني بالطبع إما مولدات حزمة متعادلة أو مصادر للإشعاع الراديوي/ الأشعة المايكروية (أو كلاهما) وأي منها يحتاج إلى تطوير تكنولوجي واسع.

إن توفير الحل لأي من هذه المشاكل الهندسية سيتطلب مشروعاً تطويرياً رئيساً. وتوحي القائمة عند أخذها بصورة مجتمعة أن تكنولوجيا الاندماج النووي التجارية تحتاج إلى عقود من الزمن ومليارات الدولارات كتمويل للبحوث – وذلك بعد إنجاز التعادل والاتقاد بصورة علمية.

ومع تخفيض التمويل للبحوث والتطوير في مجال الاندماج ليس هناك من مجال

17 ـ هناك إمكانية علمية لاندماج نظيف حيث لا تختلق عناصر مشعة. فتفاعلات الاندماج الثالث والرابع المبنية في هامش الشكل 11-17 لا ينتج منها تريتيوم. إضافة فإن التفاعل الرابع لا يتضمن أي نيوترونات ناتجة من الاندماج وسيلغي لذلك متطلبات البنية الساندة للقصف عالي الطاقة الذي يعتبر مصدراً إضافياً للإشعاع في تفاعلي DT وDD. وهذه الاحتمالات على أي حال أبعد حتى عن التفاعل المتوقع الأول (DT) بسبب درجات الحرارة الأعلى بكثير والتي ستكون مطلوبة.

للاندماج للتحرك بعيداً في مرحلة التطوير الهندسي حتى إذا ما أحرزت اختراقات علمية. والاندماج جزئياً ضحية لوعوده غير المحققة وجزئياً ضحية للقوى السياسية. غير أن النتيجة على أي حال هي أن هذه التكنولوجيا مثل مصادر الطاقة البديلة الأخرى يحتمل تطويرها فقط عندما يكون هناك شعور بحاجة ملحّة عند وقت ما في المستقبل. وربما تغير العوامل البيئية أو الاقتصادية المنطق السياسي. غير أن ذلك الوقت ليس قريباً ويبقى وعد الاندماج النووي معتماً وإمكانية مازالت نائية.

المراجع

حرارية - شمسية — Solar thermal

Anderson, B. *Solar Building Architecture*. *Cambridge*, MA: MIT Press, 1990.

Beckman, W. A., S. A. Klein and J. A. Duffie. *Solar Heating Design*. New York: Wiley Interscience, 1977.

Dorf, R. «*Energy Resources and Policy*» *:Solar Energy Reading*, Chapter 17, MA: Addison Wesley, 1978.

«Energy Technologies and the Environment». U.S. Department of Energy, Report No. DOE/EP0026. Washington, DC, June 1981. Available from National Technical Information Service (NTIS), Springfield, VA.

Penner, S. and L. kerman. «Non - Nuclear Technologies», *Energy*: Vol. 2, Chapter 14. Reading, MA: Addison-Wesley, 1975.

وقود مصنَّع — Synthetic fuels

Archer, L. J. *Exhausting Our Options: Fuel Efficient Cars and the Environment*. Parchment (Oxford) Ltd.: Oxford Institute for Energy Studies, 1992.

Bain, R. L. and J. Jones. Renewable Electricity from Biomass.» Solar Today: May/ June, 1993. pp 21-23.

Bull, S. R. «The U.S. Department of Energy Biofuels Program.» Energy Sources: vol. 13, 1991. pp 433-442.

Dunn, P. D. Renewable Energies: Sources, Conversion and Application. London: P. Peregrinius Ltd., 1986.

Garg, D. P. «Impact of Biomass Alternative Strategies.» in: Progress in Solar Engineering, D. Y. Goswami, ed. NY.:Hemisphere Press (Harper & Rowe), 1987.

Johansson, T. B., H. Kelly, A. K. N. Reddy and R. H. Williams (eds.). Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity. Washington, DC.: Island Press, 1993.

Lee, B. S. 1982. Synfuels from Coal. American Institute of Chemical Engineers, Vol. 78. Monograph Series no. 14.

Meynell, P. J. Planning a Digestor. 2nd Edition. Dorchester, NY.: Prism Press, 1982.

Miles, T. R. and T. R. Miles, Jr. «Overview of Biomass Gasification in the USA.» Biomass: vol. 18, 1989. pp 163-168.

Patterson, W. Power from Plants - The Global Implications of New Technologies for Electricity from Biomass. London: The Royal Institute of International Affairs Earthscan Publications, Ltd., 1994.

Penner, S. S. and L. kerman. Energy. Reading, MA.: Addison-Wesley, 1975. Vol. 2: Non-Nuclear Technologies, Chapter 10.

Schell, D. J., J. D. McMillan, G. P. Philippides, N. D. Birman and C. Riley. «Ethanol from Lignocellulosic Biomass,» Advances in Solar Energy. K. W. Boer, ed. Boulder, CO.: American Solar Energy Society, 1992. Vol. 7, Chapter 10.

Nuclear fusion — انشطار نووي

Blake, E. M. 1980. «Fusion in the United States» Nuclear News (four-issue series), June, Part I: «An Overview. « pp. 59-67, July, Part 2: «Magnetic Confinement: The Hunt for Heat.» pp. 45-8, August, Part 3: Sept., Part 4: 'The Issues Yet to Come.» pp. 38-41.

Close, F. Too Hot to Handle: The Racefor Cold Fusion. Princeton, NJ.: Princeton University Press, 1991.

Conn, R. W. 'The Engineering of Magnetic Fusion Reactors.» Scientific American: vol. 249, Oct. 1983. pp. 60-71.

Cordy, J. G. «Progress Toward a Tokamak Fusion Reactor.» Physics Today: January 1992. pp. 22-30.

Furth, H. P. «Reaching Ignition in the Tokamak.» Physics Today: March 1985. pp.53-61.

Hagler, M. O. and M. Kristiansen. An Introduction to Controlled Thermonuclear Fusion. Lexington, MA.:Lexington Books, 1977.

Lidsky, L. M. «Trouble with Fusion.» Technology Review: vol. 87, March 1983.

Penner, S. S. Energy. Reading, MA.: Addison-Wesley, 1976. Vol. 3: Nuclear Energy and Energy Policies, Chapter 23.

Science, 14 July 1995, Plasma Physics. «Go Back to Basics, Says the NRC Panel.» pp.153-154.

Sproull, R. L. Modern Physics. NY.:Wiley, 1963.

Stacey, W. M. Fusion - An Introduction to the Physics and Technology of Magnetic Confinement Fusion. New York: Wiley-Interscience, 1984.

Street, J. Politics & Technology. New York :The Guildford Press, 1992.

خاتمة

«عطش الأميركيين للنفط الأجنبي يتنامى». كان ذلك عنوان مقالة ظهرت في جريدة *Indianapolis Star* في 5 أيلول/ سبتمبر 1996.

وأشارت المقالة إلى أن الولايات المتحدة كانت تستورد خلال سنة 1996 نصف استهلاكها من النفط تقريباً – وهي النسبة نفسها التي كانت تستوردها في بداية عقد السبعينيات. إضافة إلى ذلك، كان توفر البنزين الرخيص يبعد سائقي السيارات والأعمال التجارية عن الكفاءة في استخدام الوقود. وقد أصبحت سيارات المنفعة الرياضية (رباعية الدفع) والباصات الصغيرة والشاحنات الصغيرة وكلها من مستهلِكات البنزين المسرفة متفشية. وبدا أن اعتماد أميركا على مصادر الوقود الأجنبي يتنامى. واستمرت المقالة تقول إن الخبراء يتوقعون أن الولايات المتحدة ستَسِد نحو 55 في المئة من حاجاتها للنفط بحلول عام 2000.

بدأنا هذا الكتاب بقصة أزمة الطاقة في السبعينيات. وعلينا الآن أن نتساءل ونحن ندخل القرن الجديد: هل نحن على حافة تكرار تلك الأزمة؟ هناك بالطبع اختلافات مهمة بين السبعينيات والتسعينيّات. وأهمها وجود مصادر عديدة أخرى للتجهيز خارج منظمة أوبك مقارنة بما كان متوفراً في السبعينيات، وهو ما يقلل إمكانية حدوث مقاطعة لأسباب سياسية أو حصول تلاعب بالأسواق. والسوق الآن أكثر حرية وهو ما يشجع على تقليل العجز – رغم أن ذلك يُقرن في الأغلب بأسعار أعلى.

غير أن التشابه مع السبعينيات ما زال حقيقياً جداً. فكما قال أحد الخبراء الذي استُشهد بهم «لن نستطيع أبداً الهروب من الشرق الأوسط»، أو على الأقل إن الأميركيين لن يهربوا طالما بقينا نعتقد بوجود نفط غزير ورخيص إلى الأبد. وغدت فترة أزمة الطاقة بالنسبة إلى عموم الناس مأزقاً قديم العهد وحقبة من حقب التاريخ.

ومع ذلك فإن المسائل التي أثارتها ما زالت معنا ولم يُعثر على حلول بعيدة المدى لها. هناك علاوة على ذلك مشاكل جديدة تتعلق بالطاقة مثل احتمالية الاحترار الكوني الذي يجب أن يسترعي انتباهنا.

فهل نحن على شفا أزمة طاقة جديدة؟ لا توجد طريقة لنعلم أو نقرر ذلك، رغم قول البعض إن الأزمة موجودة حالياً، يخفيها مظهر الوفرة، وإن أخطارها تتفاقم يومياً. ويرد الآخرون قائلين أن لا داعي للقلق حول حدوث أزمة جديدة أو عدمه لأننا سنجد الحلول عندما نحتاجها.

غير أن المهم هو إدراك أن مصادر الطاقة هي مكون أساسي للمجتمع الصناعي الحديث – وهي مكوّن لا يمكن لمجتمعات من هذا النوع الاستمرار من دونه. ورغم أن الاقتصاد قد ينمو وأن الطاقة قد تبدو مشكلة بعيدة، إلا أن ذلك المنظور قد يتغير إذا ما تغير وصولنا إليها. إننا غير قادرين على معرفة المستقبل، لكننا لا نستطيع أن نأخذه على عواهنه كذلك. وطالما بقينا لا نمتلك حلولاً بعيدة المدى لمأزق توافر مصادر الطاقة واستخداماتها فنحن نواجه إمكانية حدوث أزمة. ويمكن لتهاون المجتمع الأميركي في هذا العقد الأخير من القرن العشرين أن يتحطم فجأة ويمكن لسنة 2000 أو 2005 أو 2010 أن تصبح سنة 1973 أخرى.

المراجع

Fernandez, B. 'Americans thirst for foreign oil continues to grow.' *The Indianapolis Star*: 15 september 1996.

* وصلت هذه النسبة إلى نحو 66.8 في المئة عام 2007 اعتماداً على إحصائيات B. P. Statistical Review of World Energy, June 2009.

الملحق (أ) الأسس العلمية

تحويل الطاقة

تهدف كل تكنولوجيات الطاقة إلى توفير الطاقة في أشكال مفيدة مثل الشغل الميكانيكي والكهرباء والحرارة المفيدة. والحقيقة أننا عندما بحثنا في حاجة المجتمع إلى الطاقة في الفصل الرابع، انصرف تفكيرنا إلى الطاقة كمعادل لسلعة مادية بالنسبة إلى مستخدمها أو كعامل يدخل ضمن الإنتاج. أي إننا نظرنا إلى الطاقة ككمية قابلة للشراء أو مخصصة لإنجاز أهداف ذات فائدة.

ويجب على الطاقة لكي تكون سلعة ذات فائدة أن تكون قابلة للتحويل إلى الشكل الذي تستخدم به في النهاية. فالطاقة الكامنة مثلاً في الماء المخزون وراء سد عالٍ تحول إلى شكل مفيد من الطاقة (شغل ميكانيكي أو كهرباء) ما إن يسقط الماء ليدوّر محور ناعور مائي أو توربين (انظر الفصل الثالث). أما الطاقة المحتجزة في المركبات الهيدروكربونية لأنواع الوقود الأحفوري فتصبح ذات فائدة عندما يحترق ذلك الوقود ويتحول إلى حرارة. ويمكن للطاقة الحرارية المطلقة من الفحم أن تكون ذات فائدة لتدفئة الفضاءات أو في العمليات الصناعية أو أن الحرارة ذاتها قد تحوَّل إلى شغل ميكانيكي أو كهرباء.

وطريقة التحويل الأخيرة ذات أهمية خاصة لنا في هذا الملحق. فطريقة تحويل الحرارة إلى طاقة شغل مفيد تدعى بالمرتكز التكنولوجي للمجتمع الصناعي الحديث. والاسم التاريخي لكافة أنواع المكائن هذه هو «المحركات الحرارية». وتوفِّر المحركات الحرارية بكافة أنواعها (التوربينات البخارية، المحركات العاملة بالبنزين وما إلى ذلك) القدرة للمجتمعات الصناعية اليوم. وتقوم مثل هذه المحركات بصورة عامة بتحويل حرارة الاحتراق إلى صورة مفيدة مثل الشغل الميكانيكي أو الكهرباء.

والمحركات التي تحول حرارة احتراق الكتلة الحيوية الكحولية ستكون في الصنف نفسه. وما المفاعل النووي إلا مصدراً حرارياً لتشغيل توربين بخاري.

والأسس العلمية لفهم عمل والمحددات الأساسية للمحركات الحرارية موجودة في الثيرموديناميكا، حيث يتضمن مجموعة من الأسس العامة التي تنطبق على تحويل الطاقة وانتقال الحرارة أو أي واحد من العمليات العديدة التي تتضمن تغيراً في شكل الطاقة. وينطبق الثيرموديناميكا بغض النظر عن الوسط الذي يحمل الطاقة ونوع التفاعل الفيزيائي المتضَمَن أو المقياس الذي تعمل خلاله الطاقة. ويستند هذا العلم حسب أفضل الممارسات العلمية الحديثة على ملاحظات وتجارب مكررة تتلاءم مع خطة نظرية متماسكة. والموضوع الأكثر أهمية في المجتمع الحديث هو توليد الكهرباء. فالكهرباء توفِّر وسائل نقل وتوزيع الطاقة التي كانت قد حولت إلى صورة مفيدة بطريقة حرارية أو بوسائل أخرى. ونقوم في الفصل الثالث بوصف محطة كهرباء تقليدية بما في ذلك المولد الكهربائي. أما هنا فسنراجع الأسس التي يرتكز عليها التوليد الكهربائي بعد أن نبحث في أسس الثيرموديناميكا.

وحدات القياس

هناك قيد الاستعمال اليوم عدد من أنظمة وحدات قياس الكميات الفيزيائية مثل الطاقة والقدرة. ولكل نظام مجموعة أساسية من الوحدات تقيس عادة الطول والكتلة والزمن. وهكذا يدعى النظام المتري الحديث بنظام MKS حيث يمثل ذلك الطول (Meter) والكتلة (Kilogram) والوقت (Second) وهي الوحدات الأساسية الثلاث. وإذا كنا نقوم بقياسات كهربائية فعلينا إضافة وحدة أساسية أخرى تمثل الشحنة أو التيار[1].

وتدعى كافة وحدات القياس غير الأساسية بالوحدات المشتقة ويعني ذلك أن بالإمكان التعبير عنها بطريقة مساوية باستخدام الوحدات الأساسية. فالقوة مثلاً تقاس بالنيوتن (N) في نظام MKS لكن يمكن التعبير عنها بطريقة مساوية بالكيلوغرام مقسوماً على الثانية في الثانية،

$$[N] = \frac{[kg]}{[sec^2]}$$

1 ـ إن وحدة الشحنة في نظام MKS هي الكولومب (Coulomb) وهي شحنة مقدارها (2.56×10^{18}) إلكترون. ووحدة التيار هي الأمبير (Ampere) والأمبير الواحد يساوي (تدفق كولومب واحد في الثانية).

وهذا ناتج من قانون نيوتن عن القوة المطلوبة لتسريع الكتلة. ويصبح نظام MKS بهذه الطريقة متناغماً ذاتياً ويمكن إجراء الحسابات مع التوكيد أن الإجابات الرقمية ستكون دائماً في وحدات النظام.

ويصبح تحويل الوحدات ضرورياً عندما يتم الانتقال من نظام إلى نظام آخر. ففي حقل الطاقة نواجه بصورة متكررة وحدات بريطانية مثل وحدة الحرارة البريطانية (BTU) والقدرة الحصانية والغالون وذلك بسبب استخدامها العام وكونها مألوفة في الولايات المتحدة والعالم الناطق بالإنجليزية.

وإليك جدولاً لوحدات MKS المستخدمة في بحثنا عن الطاقة خلال هذا النص. وقد بينت الرموز داخل أقواس.

جول (J): الطاقة

واط (W): القدرة، الوتيرة الزمنية لإيصال الطاقة أو استخدامها

متر (M): الطول (أساسي)

كيلوغرام (kg): الكتلة (أساسي)

ثانية (s): زمن أساسي

نيوتن (N): القوة

درجة مئوية ^{o}C: درجة الحرارة على المقياس المئوي

كلفن (K): وحدة حرارة مطلقة، على مقياس كلفن (الصفر المطلق هو 273− ^{o}C)

كيلوكالوري (kcal): طاقة حرارية[2]

لتر (1): الحجم

الأمبير(A): التيار الكهربائي: انظر الهامش (1)

الفولت (V): الفولتية الكهربائية[3]

---

2 الكيلو كالوري تستند إلى الحرارة المطلوبة لرفع درجة حرارة كيلوغرام واحد من الماء درجة حرارة ^{o}C واحدة. ويمكن قياس الطاقة الحرارية أيضاً بالجول (المتري) إسوة بالطاقة الميكانيكية أو الكهربائية. وهذا في الحقيقة ازدواج داخل نظام .MKS وما يعادله 1 جول: = Kcal 0.24 x 10^{-3}

3 ـ يجري التفكير في الفولتية كمقياس للقوة الدافعة للتيار الكهربائي خلال وسط ناقل بنفس طريقة ضغط الماء الذي يتدفق في الأنابيب. ورغم أن التشابه ليس دقيقاً فإن مفهوماً أفضل للفولتية كمقياس للطاقة الكامنة الكهربائية سيعطي في هذا المحلق في ما بعد (انظر الهامش 17).

إلكترون فولت (eV): الطاقة (1.602×10^{-19} جول) المطلوبة لتحريك إلكترون عبر فرق جهد كهربائي (انظر القسم التالي) يبلغ 1 فولت:

وفي ما يلي جدول مشابه للوحدات البريطانية التي يستخدم معظمها في هذا النص. وقد سمّي النظام البريطاني بنظام القدم – الباوند – الثانية (FPS) بالإشارة إلى وحداته الأساسية.

القدرة الحصانية (HP): مقياس للقدرة أو الوتيرة الزمنية لإيصال الطاقة أو استخدامها.

القدم (ft): مقياس معروف للطول

سلغ (slug) :مقياس كتلة غير مألوف الاستخدام[4]

ثانية: زمن، ذاتها في نظام MKS

باوند (lb): قوة وهو مقياس معروف للوزن – قوة الجاذبية

درجة فهرنهايت (^oF): درجة الحرارة.

درجة رانكن :(^oR) درجة الحرارة المطلقة على مقياس رانكن (الصفر المطلق لهذا المقياس = 460^oF).

BTU: وحدة طاقة حرارية[5]

غالون: مقياس حجم

التالي هي عدد من تحويلات مفيدة بين وحدات النظام المتري والنظام الإنجليزي.

الطاقة

1 جول = 0.949×10^{-3} BTU

1 kw - hr = 3.412 BTU [6]

4 ـ كتلة مقدارها سلغ واحد لديها قوة جاذبية تبلغ 1 باوند عند سطح الأرض.

5 ـ تمثل الوحدة الحرارية البريطانية BTU كمية الحرارة المطلوبة لرفع درجة حرارة باوند واحد من الماء درجة حرارية فهرنهايت واحدة.

6 ـ إن kw – hr (كيلوواط – ساعة) من الطاقة المسلمة أو المستخدمة عند مستوى قدرة يساوي 1 كيلوواط (10^3واط) لمدة 1 ساعة وهو المقياس المعتاد استخدامه في قياس استهلاك الكهرباء. إن القيمة الحرارية لمولد كهربائي يعتمد على الطاقة الحرارية تقاس عادة بـ (BTU/ KW –hr). وتمثل القيمة BTU/ KW – hr 3.412 قيمة حرارية لكفاءة تحويل تبلغ 100 بالمائة.

القدرة

1HP = 0.746 kW

الكتلة

1gk = 2.2 lb

$(10^3 kg)$ = 1.1 ton (2,200 lb) = طن متري

درجة الحرارة

$[^oF] = 9/5. [^oC.] + 32^o$

درجة الحرارة/ معادل الطاقة[7]

KeV $1 \approx 10^7$ ºC

طاقة حرارية

0.24×10^{-3} kcal = 1 جول

0.940×10^{-3} BTU =

الحجم

1 غالون (أميركي) = 3.78 ليتر

1 برميل (42 غالون أميركي) = 160 ليتر[8]

أشكال الطاقة

تخبرنا قوانين الفيزياء أن الطاقة توجد في الأشكال التقليدية للشغل والطاقة الحركية والطاقة الكامنة والحرارة وفي الأشكال المخفية (النووية) لمعادل الكتلة – الطاقة.

الشغل

الشغل هو قوة تعمل عبر مسافة كما يعبّر عنها في

7- إن هذا التحويل التقريبي يعطي معدل الطاقة الحركية مقاسة بـ kev (10^3 الكترون فولت: انظر قسم وحدات القياس) لجسيمة في غاز بلازما ساخن (انظر الفصل الحادي عشر). والعلاقة الدقيقة هي (الطاقة الحركية) E = kT حيث إن $k = 0.862 \times 10^{-7}$ kev/ Kº (وهذا هو ثابت بولتزمان) حيث أن T هي الحرارة المطلقة بمقياس كلفن

8- البرميل (/BB) مقياس يستخدم عادة لقياس كميات النفط.

$W = F.d$ (J)

حيث إن F = القوة (N) و d = المسافة (m) للإزاحة المقطوعة عبر مسالك مستقيمة أو منحنية بما في ذلك إزاحة دورانية صرفة

الطاقة الحركية

الطاقة الحركية هي طاقة الحركة، كما يعبّر عنها كالتالي

$K = 0.5\ mv^2$ (J)

حيث إن m = الكتلة لجسم متحرك (kg) وV = سرعة الكتلة (m/sec) للحركة المقطوعة. والطاقة الحركية موجودة أيضاً في الحركة الدورانية.

الطاقة الكامنة

الطاقة الكامنة هي الطاقة التي يمكن تحويلها إلى أشكال أخرى للطاقة، لكنها لم تحول بعد. ويعبّر عن جهد الجاذبية المطلوب للتحول إلى طاقة ميكانيكية كالتالي

$P = mgh$ (J)

حيث إن m = كتلة الجسم (kg)وg = ثابت الجاذبية الأرضية (N/s^2) وh = ارتفاع الجسم فوق مستوى مرجعي. وتوجد الطاقة الكامنة في أنظمة مثل الأنظمة الكهربائية والكيميائية.

الحرارة

يعبّر عن الطاقة الحرارية بالعامية بالمحتوى الحراري وهو مقدار الطاقة الحرارية (كأن تكون BTUs) داخل جسم صلب أو سائل أو غازي[9]. وتعرف الحرارة في الاستخدامات الهندسية على أنها الحرارة المنقولة من كتلة ما إلى كتلة أخرى عندما يكون هناك فرق بين درجة حرارة الكتلتين. لذا فمن الأولى أن نسمي هذه بالحرارة المنقولة ويرمز لها بالحرف (Q).

معادل الكتلة – الطاقة

يبين هذا الاكتشاف المدهش في الفيزياء الحديثة أن الكتلة والطاقة متساويتان مما قاد إلى تحويل الكتلة إلى طاقة قابلة للاستخدام في المفاعل النووي.

9ـ يصنّف المحتوى الحراري بصورة أدق ضمن التعبير الهندسي العلمي (الطاقة الداخلية) والذي يستخدم في البحث الثيرموديناميكي الذي سيلي.

تعاريف ثيرموديناميكية

لكي نجري مراجعة منتظمة لقوانين الثيرموديناميكا من الضروري في البدء تعريف بعض التعابير والمفاهيم المستخدمة في المراجعة.

النظام هو المجموعة المحددة من مادة العمل ومجال معيّن تحدث ضمنه العملية الثيرموديناميكية أو يجري الحصول على حالة ثيرموديناميكية محددة فيه. وقد تكون مادة العمل غازية وسائلة أو صلبة.

الحد هو سطح مغلق حقيقي أو خيالي يغلف النظام ويفصله عن بقية العالم.

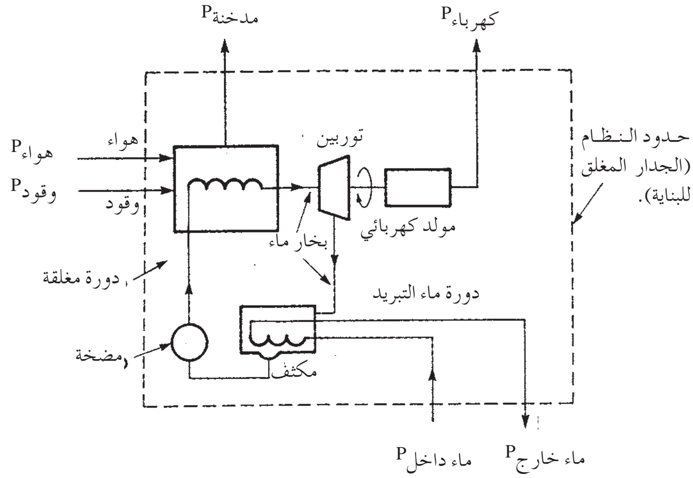
المحيط ويشمل كل المادة والمجال خارج نطاق حدود النظام.

لا يوجد تبادل للمادة أي (الكتلة) في نظام مغلق مع المحيط غير أن تبادل (انتقال) الحرارة قد يحدث مع المحيط.

أما في نظام مفتوح فهناك تبادل للمادة، وفي الأغلب بصورة جريان للمادة من وإلى المحيط، وعادة ما يصاحب ذلك تبادل حراري مع المحيط.

والنظام المعزول افتراضياً غير متأثر بمحيطه بأي صورة ثيرموديناميكياً، أي إن أي تبادل للمادة أو الحرارة مع المحيط غير موجود.

بإمكاننا استخدام هذه المصطلحات بالإشارة إلى محطة قدرة بخارية حديثة. ففي الإمكان تعريف النظام الثيرموديناميكي على أنه المحطة بكاملها كما نستطيع أن نقول إن كل من أجزائها الداخلية كالمرجل والتوربين البخاري والمولد الكهربائي أو المكثف يشكل نظاماً منفصلاً (انظر الفصل الثالث). وإذا اخترنا أن نعرّف المحطة كلها كنظام فستكون حدود النظام هي الجدران المحيطة للبناية (انظر الشكل 1-A). وهذه المحطة بكاملها ليست على وجه التأكيد نظاماً معزولاً وليست حتى نظام مغلق إذا ما أخذنا بالاعتبار كتلة الوقود والهواء وماء التبريد التي تتدفق إلى المحطة وكتلة النفايات من رماد وغازات المدخنة وماء التبريد الضروري لتشغيلها. ومن الممكن مع ذلك إذا جرى تعريف حدود النظام بطريقة ملائمة تصور نظام مغلق للمحطة لديه تبادل للطاقة مع المحيط لكنه لا يمتلك تبادل للكتلة تتدفق إليه أو خارجة منه.



الشكل 1-A: شكل تخطيطي لمحطة قدرة كهربائية حرارية

$$P_{\text{دخل}} = P_{\text{وقود}} + P_{\text{هواء}} + P_{\text{ماء داخل}}$$

$$P_{\text{خرج}} = P_{\text{كهرباء}} + P_{\text{مدخنة}} + P_{\text{ماء خارج}}$$

مقتبسة من: .R. C. Dorf, Energy Resources and Policy

Cambridge, MA: Ballinger, 1978.

تمر مثل هذه الحدود التخيلية خلال غرفة الاحتراق (الفرن) بحيث تعزل غازات الاحتراق وكتلة الفحم والرماد. ويجب أن تمر الحدود خلال المكثف أيضاً بحيث تعزل كتلة ماء التبريد المتدفق (انظر الفصل الثالث). ولا يمر خلال هذه الحدود رغم كونها نظرية سوى الطاقة: ويشمل ذلك الحرارة المنتقلة في المرحل من الفرن إلى مادة الشغل (أي الماء/ البخار) وحرارة التكثيف المنتقلة من مادة الشغل إلى ماء التبريد وبالطبع الطاقة الكهربائية المنقولة من المولد إلى الحمل المربوط إليه.

وتدور مادة الشغل لكل محطة توليد بخارية فعلياً في دورة مغلقة (انظر الشكل 1-A). تكون البداية بشكل ماء يسخن في المرجل ليصبح بخاراً يمر خلال التوربين ثم يكثف ليعود إلى حالة ماء ومن ثم يبدأ الدورة ثانية. وإذا قارنا هذا التدوير لمادة الشغل مع الماكينة البخارية من النموذج القديم حيث يجري طرح البخار (مادة الشغل) من المكبس بعد كل شوط قدرة فستكون الماكنة البخارية نظاماً ثيرموديناميكياً مفتوحاً.

وأخيراً فإن الأنظمة الثيرموديناميكية المعزولة ليست إلا مثاليات جرى تقريبها

مختبرياً أو التفكير بها كنماذج للتشغيل الفعلي. والنظام المعزول بصورة صحيحة لن تكون له وسائل ميكانيكية أو كهربائية لاستلام طاقة الشغل من المحيط، ويجب أن يكون معزولاً حرارياً بصورة كاملة (أي لا يمكن أن يحدث انتقال حراري معه أكان ذلك بالتوصيل والحمل والإشعاع أم بأي طريقة أخرى) عن المحيط. وقيمته الوحيدة هي أنه يمكن أن يوفِّر نموذجاً تصورياً لإلقاء الضوء على طريقة عمل قوانين الثيرموديناميكا.

تحول الطاقة: القانون الأول للثيرموديناميكا

إن أبسط طريقة يمكن أن يصاغ بها القانون الأول للثيرموديناميكا هي كالآتي:

لا يمكن استحداث الطاقة أو إفناؤها.

ويعتبر قانوناً لأنه قد اختبر مراراً في تجارب ولم تلحظ فيه أي مخالفة. ويخدم أيضاً كجزء من أسس خطة متماسكة ذاتياً بصورة كاملة للنظرية الفيزيائية وتعتبر أساساً لفرضية تقول «إن كمية الطاقة الكلية في الكون ثابتة».

وليس من الواضح في البداية كيف يمكن تطبيق مثل هذا القانون ذي الصياغة الواسعة في تكنولوجيات الطاقة العملية. أحد الأساليب هو التفكير في أنظمة ثيرموديناميكية مختلفة. وأبسط الحالات هي النظام المعزول حيث يكون التفسير بسيطاً – لمجموع الطاقة المحتواة ضمن النظام المعزول الذي لا يمكن أن تتغير. والمثال العملي الآخر هو النظام المغلق حيث يمكن حدوث انتقال الحرارة إلى المحيط غير أن انتقالات الكتلة لا تحدث. وهنا يمكن وضع القانون الأول بصيغة موازنة الطاقة في النظام[10] وكما يلي:

الطاقة الداخلة = الطاقة الخارجة (بالجول)

ويبين الشكل 1-A تطبيق هذه الموازنة للطاقة على محطة قدرة تقليدية بصورة تخطيطية. وتمثل هذه المحطة دورة مغلقة تعيد تدوير البخار والماء (انظر أيضاً

10 ـ في حالة الأنظمة القادرة على خزن الطاقة تصبح هذه المعادلة $E_{in} = E_{out} + E_{stored}$ وسنستعرض أنظمة عملية فيها خزن بما في ذلك محطات كهرومائية تقليدية ومحطات كهرومائية مع الضخ (Hydroplants) وبطاريات (انظر الملحق ج).

الشكل 3-3). وبحسب هذا تستبعد حدود النظام التدفق الكتلي للوقود وماء التبريد (داخلاً وخارجاً) وغازات الاحتراق (الهواء الداخل وغازات المدخنة الخارجة). غير أن النظام يشمل تدفق الطاقة لهذه الكتل دخولاً وخروجاً. ويمكن كتابة معادلة التوازن في حالة محطة قدرة ذات وتيرة ثابتة لتبادل الطاقة بمصطلحات القدرة (الوتيرة الزمنية لسريان الطاقة – انظر قسم وحدات القياس) وكما يلي:

$P_{\text{دخل}} = P_{\text{خرج}}$ بالواط حيث تكون (بالرجوع إلى الشكل 1-A)

$P_{\text{دخل}} = P_{\text{وقود}} + P_{\text{هواء}} + P_{\text{ماء داخل}}$

= مجموع الطاقة المتدفقة إلى داخل النظام (واط)

بينما تكون $P_{\text{خرج}} = P_{\text{كهرباء}} + P_{\text{مدخنة}} + P_{\text{ماء خارج}}$

= مجموع الطاقة المتدفقة إلى خارج النظام (واط)

هكذا نرى انتقال الطاقة داخل وخارج دورة البخار المغلقة لمحطة القدرة. ونعلم من القانون الأول أن كل ما يدخل من الطاقة يجب أن يخرج أو أن حالة الوتيرة المستقرة لإنتاج الطاقة تستدعي أن يكون مجموع الطاقة الداخلة مساوياً لمجموع الطاقة الخارجة.

ومع ذلك فليست الطاقة الخارجة من المحطة كلها ذات فائدة. وبالنسبة إلى محطة قدرة كهربائية عموماً يكون المخرج الوحيد المفيد هو الكهرباء. وتعتبر كفاءة المحطة مقياساً للجزء المفيد من الطاقة

$$\eta = \frac{E_{\text{مفيدة}}}{E_{\text{وقود}}}$$

$$= \frac{P_{\text{كهرباء}}}{P_{\text{وقود}}}$$

(وذلك لمحطة ذات إنتاج طاقة مستقر)

وتدعى كفاءة المحطة في بعض الأحيان بقانون الكفاءة الأول لأنها تستند إلى تلك القاعدة. وهي أيضاً مقياس عملي على أي حال لأنها تقوم فقط بتقييم الناتج المفيد للطاقة مقابل مدخل الطاقة من الوقود وهو المدخل الوحيد للطاقة الذي له كلفة

تشغيلية مباشرة. وربما نلاحظ أيضاً أن محتوى الطاقة في الهواء الداخل (هواءP) يمكن إهماله مقارنة بطاقة الوقود الداخل، وهكذا يمكن كتابة معادلة موازنة الطاقة بصورة تقريبية كالآتي:

$$P_{\text{ماء خرج}} + P_{\text{كهرباء}} \approx P_{\text{ماء دخل}} + P_{\text{وقود}}$$

والتي يمكن أن نحلها للكهرباء الخارج وكالتالي

$$P_{\text{كهرباء}} \approx P_{\text{وقود}} - P_{\text{مدخنة}} - P_{\text{خرج صافي}}$$

حيث جرى جمع آخر حد في الحد الواحد

$$P_{\text{خرق الطاقة (الماء)}} = P_{\text{ماء داخل}} - P_{\text{ماء خارج}}$$

وهذا يمثل منتوجاً صافياً من طاقة حرارية مهدورة يحملها معه ماء التبريد. وسنبحث في أهمية هذه الحرارة المهدورة خلال بحثنا في القانون الثاني للثيرموديناميكا.

وعلينا تبعاً لتعاريفنا الثيرموديناميكية بالنسبة إلى نظام مفتوح، النظر في أي تدفق كُتْلوي يحدث خلال حدود النظام. فكر مثلاً بتوربين البخار وحده أي عرّف حدود النظام كأنما يحيط فقط بهذا المكوِّن المفرد من دورة البخار. وهنا يجب أن تكتب العبارة العامة (مدخول الطاقة = منتوج الطاقة) على وجه التحديد بمصطلحات أشكال الطاقة المختلفة (الشغل، الطاقة الحركية، الطاقة الكامنة والحرارة) لكي نتمكن من احتساب التحول بين أشكال الطاقة المختلفة في العملية المفتوحة. ويجري استخلاص الشغل في التوربين البخاري عند مرور كتلة البخار وتمددها واكتسابها سرعة وهذا ما يحدث بسبب تغيرات رئيسة في الضغط والحجم والطاقة الحركية والمحتوى الحراري الداخلي. وجميع هذه التغيرات تؤخذ بالحساب في الحسابات الثيرموديناميكية التي تتطلب الحفاظ على الطاقة – وكذلك الكتلة – من مدخل النظام إلى مخرجه.

محددات تحول الطاقة: القانون الثاني للثيرموديناميكا

لا يمكن لعملية تحويل حرارية أن تكون كاملة تماماً. فالبخار في محطة القدرة مثلاً لا يمكن تحويله كله إلى شغل أو طاقة كهربائية في أي نظام حياة في الواقع

الفعلي. فالتحول الكامل يتطلب الاحتفاظ بالمحيط عند الصفر المطلق إضافة إلى عدم وجود أي خسارة أو أي احتكاك. وهذه المتطلبات مجسمة في القانون الثاني للثيرموديناميكا. ولكي نفهم هذا القانون بصورة أفضل، من الضروري توسيع مجموعتنا من التعاريف عن الثيرموديناميكا.

هناك أولاً الخاصية وتتألف من الكميات الملحوظة والظاهرة للعيان التي تميز مادة الشغل ضمن النظام. فدرجة الحرارة والضغط والكتلة مثلاً هي خواص للبخار في مرجل. ويقال إن الخواص واسعة إذا ما اعتمدت على حجم النظام. فالحجم الكلي والكتلة الكلية مثلاً خواص شاملة لنظام ذي حجم معين. ومن ناحية أخرى تذكر الخواص غالباً على أساس مركّز مختزل إلى مقدار وحده مثل الحجم أو الكتلة. وأخيراً يقال إن خواص مادة شغل محددة جيداً ثيرموديناميكياً عندما يكون النظام في حالة توازن.

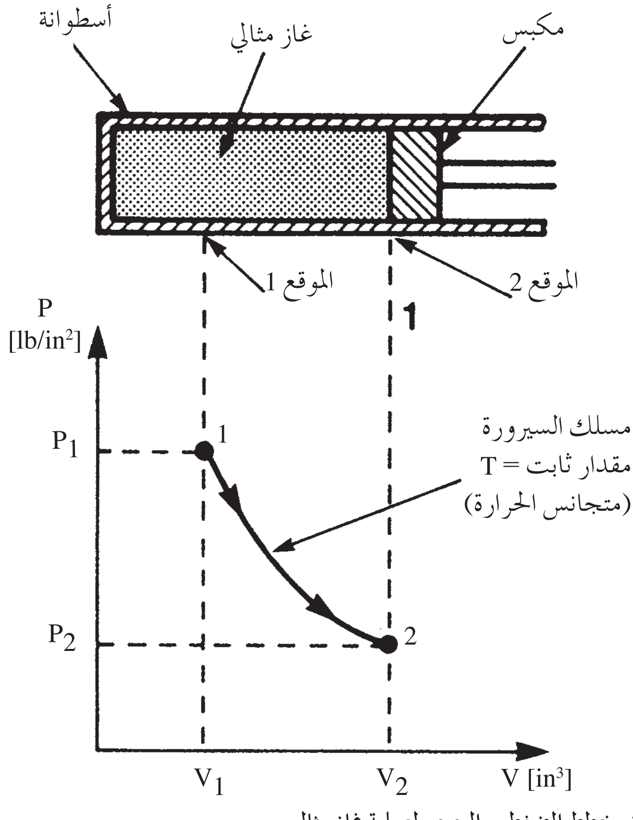
وتحدث حالة يكون التوازن فيها كافياً بحيث تكون خواص المادة داخل النظام متجانسة، ويمكن في هذه الحالة أن تميز النظام بكامله. ونحتاج لكي نعرف حالة نظام ما إلى عدد من مثل هذه الخواص لا يقل عن حد معين. ومثال ذلك نظام يحتوي غازاً مثالياً فهناك حاجة إلى ثلاث خواص – درجة الحرارة والضغط والحجم – لكي تُعَرّف حالة النظام. وسيجري تحديد الحالة في هذا النظام فقط عندما تكون درجة الحرارة والضغط للغاز متجانسين خلال كامل الحجم الذي تحتويه حدود النظام ولا تكون خاضعة للتغيير زمنياً أي إنها في حالة توازن.

وعندما تتحول إحدى حالات التوازن إلى حالة أخرى يطلق على هذه عملية (Process) وتصوَّر العملية عادة كمسلك على مخطط كما في الشكل 2-A الذي يبين عملية تمدد أيزوثيرمي (درجة حرارة ثابتة) لغاز.

ويمكن للنظام في عملية عكوسة أن يعود إلى حالته الأصلية بالرجوع عبر المسلك نفسه. ويمكن لهذا أن يحدث فقط ضمن ظروف معينة دقيقة. وفي الحالة المثالية تحدث العملية العكوسة ببطء بدرجة كافية بحيث تنتشر التأثيرات الانتقالية بطريقة سلسة على كامل النظام محافظة بذلك على وضع شبه – متوازن أثناء حدوث تغيرات الحالة. وهكذا ستكون العملية المصورة في الشكل 2-A مثلاً في شبه توازن إذا ما كان

التمدد من حالة 1 إلى حالة 2 بطيئاً بحيث تبقى معها درجة الحرارة ذاتها خلال مجمل الحجم، ويبقى الضغط متوزعاً بطريقة متساوية رغم هبوط مقداره. وتتيح العكوسية لعملية شبه متوازنة أن تحدث ثانية لتعيد النظام إلى الحالة 1 بدقة.

العملية اللاعكوسة. لا تحتفظ بشبه توازن لذا لا يمكن العودة فيها إلى الحالة الأصلية من غير مدخول لطاقة إضافية. والمصادر الأخرى للحالة اللاعكوسة هي الاحتكاك وفقدان الطاقة الذي لا يمكن استعادته على مسلك المعكوس. وربما يكون أحسن مثال لمسلك غير متوازن هو عملية الخنق التي يصورها الشكل A-3 حيث إن الاضطراب مثال ممتاز لحالة غير متوازنة.

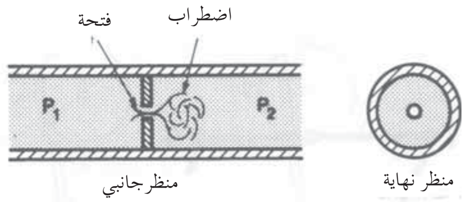


الشكل A-2: مخطط الضغط – الحجم لعملية غاز مثالي.

حدود النظام هي جدران الأسطوانة ووجه المكبس وبذلك يحدد الحجم الأسطواني (V) المملوء بالغاز المثالي كمادة الشغل. ويجري التحكم بالعملية من خلال تحريك المكبس من موقع 1 إلى موقع 2 في حين يحافظ على الغاز في درجة حرارة (T). (لاحظ أن هذا النظام مغلق وغير معزول). تُصور العملية ثيرموديناميكياً كأنها منطلقة في الحالة 1 المميزة بخواص V_1 و T، P_1 وتتواصل بطريقة سلسة إلى الحالة 2 المميزة بخواص P_2، V_2 وT.

ينطبق على الشغل الذي يؤدى على المادة في نظام ثيرموديناميكي التعريف الأساسي للشغل (W = F.d). ويمكن أن يؤدي الشغل على المادة (شغل سلبي) أو يمكن أن تؤديه المادة (شغل إيجابي). وتحدث زيادة في الشغل مع تغير جزئي في الحجم عند ضغط ثابت كما في

$$dW = pdv$$



الشكلA-3: عملية الخنق. يتدفق الغاز من حجرة الضغط العالي (P_1) خلال فتحة صغيرة إلى حجرة ذات ضغط أقل (P_2)

وهكذا فإن التمدد هو زيادة في الحجم مع كمية موجبة من الشغل تؤديها المادة والكبس (أو الانضغاط) هو تقلص في الحجم مع كمية سالبة من الشغل جرت تأديته على المادة. والشغل الكلي في الشكل A-2 الذي يؤديه الغاز المثالي في المسلك 1— 2 هو:

$$W = \int_{v_1}^{v_2} pdv > 0$$

والتكامل المأخوذ بين حدين، كما مبيّن هنا، يمكن أن يفسر على أنه المساحة تحت المنحنى للدالة التي تجري مكاملتها (في هذه الحالة هي p).

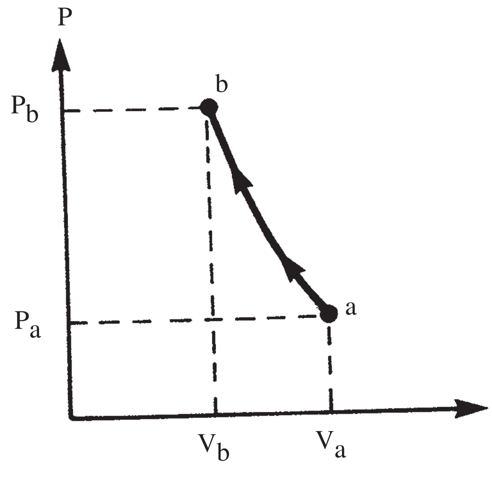
الطاقة الداخلية هي الطاقة المرتبطة بالحركة الحرارية على المستوى المجهري أي على المستوى الجزيئي والذري في مادة الشغل في النظام. وبهذا فهي تشمل الطاقة الحركية للجزيئات في حركة حرارية في غاز ساخن والحركة الحرارية للإلكترونات في الوسائل والمواد الصلبة وتذبذبات المشبكات البلورية في الموارد الصلبة. والطاقة الداخلية التي يشار إليها بالرمز (U) تقاس بالوحدات الحرارية وتتميز عن كمية الحرارة المنقولة (Q). وهي خاصية شاملة لأنها تعتمد على مجمل كتلة النظام ويمكن

اختزالها إلى خاصية مركّزة إذا ما قمنا بقياسها على أساس وحدة الكتلة.

والعملية الأدياباتية هي العملية التي لا يجري فيها أي انتقال حراري داخل وخارج إلى أو النظام. إن أي تبادل حراري (Q) يجب أن يتضمن تغيراً في الطاقة الداخلية و/ أو عمل النظام كما يعبر عنه في:

$$dQ = dU + dW$$

وذلك عن تغير إضافي في الحرارة. ولما كانت العملية الأدياباتية لا تتضمن أي انتقال حراري لذا فإن ($dQ = 0$) في كل موضع على طول المسلك من حالة إلى أخرى. إذاً يجب أن يعوض التغير في الشغل dW بالضبط بتغير إضافي في الطاقة الداخلية (dU) مع تغيرات مصاحبة في درجة حرارة النظام. ويمثل الشكل 4-A مسلكاً لانضغاط أدياباتي على مخطط p –V



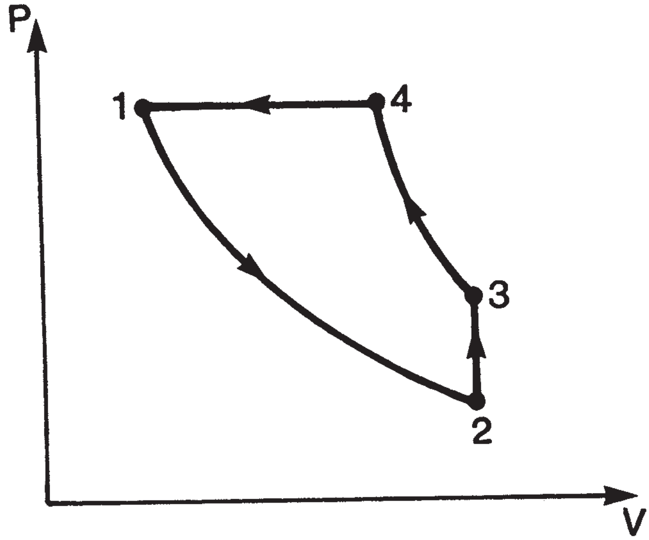
الشكل 4-A: العملية الأدياباتية

يكبس الغاز من حجم Va إلى حجم Vb مع حدود النظام العازلة حرارياً بصورة تامة بحيث لا يسمح بأي تسرب حراري إلى الخارج. لاحظ أن مسلك العملية الأدياباتية على مستوى $P - V$ أشد انحداراً من مسلك العملية الأيزوثيرمية (الشكل 2-A). وفي هذا الانضغاط الأدياباتي ترتفع درجة الحرارة.

وفي العملية الأيزوثيرمية تبقى درجة الحرارة ثابتة عبر المسلك من حالة إلى أخرى. ويمكن أن تحدث مثل هذه الحالة عن سابق تصميم أو طبيعياً كما سنرى بالنسبة إلى البخار المشبع. يفترض في صورة المكبس في الشكل 2-A وجود وسيلة

للحفاظ على درجة الحرارة ثابتة في الغاز رغم عدم ظهورها في المخطط أكان ذلك من انتقال الحرارة إلى النظام أم من الطاقة الداخلية خلال التمدد المشار إليه.

تتضمن عمليات أخرى ذات العمليات خاصية ثابتة. وهي تشمل عمليات ذات حجم ثابت وضغط ثابت (عملية أيزوبارية). ولكل منها مسلك مميز يعتمد على الخواص الأخرى.



الشكل A-5: دورة ثيرموديناميكية

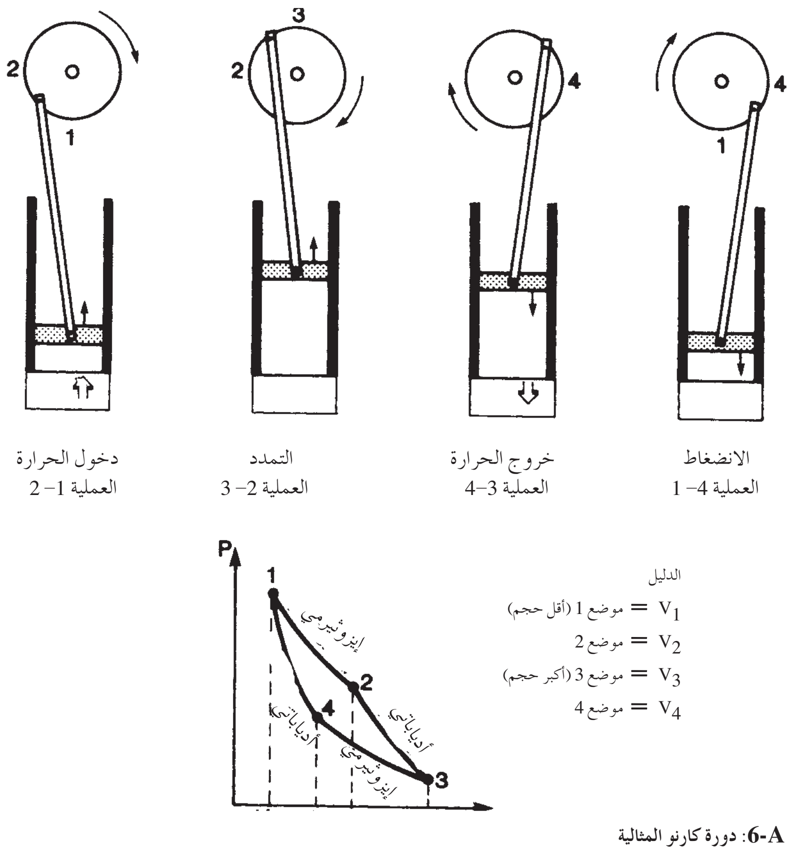
تتألف الدورة من أربعة مسالك. المسلك 1- 2 وهو عملية تمدد أيزوثيرمي. المسلك 2- 3 عملية حجم ثابت. المسلك 3-4 عملية انضغاط أدياباتي وأخيراً المسلك 1-4 وهو عملية ضغط ثابت. هذه الدورة الخاصة الافتراضية تتطلب إدخال شغل إلى مادة النظام أي إنها تمثل نظاماً لتحويل الشغل إلى حرارة بدل تحويل الحرارة إلى شغل.

والدورة هي تتابع عمليات تكون الحالة النهائية فيها حالة البداية نفسها. والمثال الافتراضي هو دورة ذات أربعة مسالك، كما يبينها الشكل A-5، كل مسلك فيها ناتج من عملية مختلفة. وفي حالة نظام مغلق تمثل الدورة كل تغيرات الخواص التي تمر خلالها كتلة مادة الشغل مرة بعد مرة خلال تحول مستمر للطاقة.

وخير طريقة للبحث في تحديدات تحويل الطاقة هي من خلال مصطلحات دورة

كارنو [سميت باسم ن. ل. س. كارنو (1796 – 1832) (N. L. S. Carnot) وهو مهندس فرنسي] وهي حالة مثالية لتحويل الحرارة – الطاقة التي اشتق بواسطتها الحد النظري للكفاءة الحرارية. يمكن تصور الدورة كالعملية الفيزيائية المبينة في الشكل 6-A الذي يمثل محركاً ترددياً يشبه المحرك البخاري (الفصل الثالث) إلى حد كبير. لاحظ بصورة خاصة ذراع التوصيل من المكبس إلى الدولاب الطيار كما في المحرك البخاري حيث يتطلب أن يصاحب تردد المكبس دوران الدولاب الطيار.

(أ)



(ب)

الشكل 6-A: **دورة كارنو المثالية**
(أ) دورة كارنو أثناء عملها
(ب) دورة كارنو شكل p-V

إن شوطاً في كل اتجاه يمثل نوعين من العمليات وهكذا فإن أربع عمليات تندرج ضمن تردد كامل إلى أعلى وإلى أسفل (أي لدورة كاملة للدولاب الطيار). والعمليات الأربع لدورة كارنو كمسلك على الشكل هي:

العملية 1− 2: مدخل أيزوثيرمي للحرارة.
العملية 2− 3: تمدد أدياباتي.
العملية 3− 4: رفض أيزوثيرمي للحرارة.
العملية 4−1: انضغاط أدياباتي.

والوسائل المثالية لتحقيق الحالات المطلوبة لكل عملية مشار إليها في الشكل أسفل المكبس. ويلاحظ على وجه الخصوص أن كل العمليات الأربع في دورة كارنو هي عمليات عكوسة. وتدعى عملية تشغيل دورة كارنو (محرك) لأن النظام يؤدي شغلاً صافياً عند عمله بهذه الطريقة. ويمكن تمثيل الشغل الصافي لدورة كاملة باستخدام التعاريف الرياضية للشغل على أو من قبل مادة كالآتي:

$$W_{net} = \int_{v_1}^{v_2} pdv + \int_{v_2}^{v_3} pdV$$

$$= \int_{v_3}^{v_4} pdv + \int_{v_4}^{v_1} pdV$$

ويمكن فهمه على المنحنى بأنه المساحة المحصورة بالمسالك الأربع على الشكل p –V. والطاقة المطلوبة للنظام ليؤدي شغل صافي مجهزة في العملية 1− 2 من كل دورة. وعمل دورة كارنو هو ببساطة تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل.

وإحدى أكثر الميزات فائدة في مفهوم كارنو للدورة هو أنها تصور محركاً مثالياً (عكوساً) يعمل بين خزانين ـ أحدهما درجة حرارته مرتفعة (T_H) والآخر درجة حرارته منخفضة (T_L). والخزان عالي الحرارة هو مصدر انتقال الحرارة إلى المحرك والخزان واطئ الحرارة هو الحوض للحرارة المطروحة. وهذا ما يبينه الشكل 7-A (أ) حيث إن Q_H تنتقل من الخزان الساخن إلى المحرك والذي بدوره يحول جزء من تلك الطاقة الداخلة إلى شغل (W) ويطرح الباقي (Q_L) في الحوض البارد. ويستخدم محرك كارنو كمعيار مثالي للمقارنة بأي محرك حراري آخر يعمل بين مصدر ذي درجة حرارة عالية وحوض ذي درجة حرارة واطئة. وتجري مقارنة الدورات الثيرموديناميكية عادة باستخدام الخاصية المدعوة الآنتروبيا (S) التي تحدد بأوضح صورة استخدام مصطلحات الحرارة المنقولة ودرجة الحرارة.

$$ds = \frac{dQ}{T} \text{ (J/K° or BTU/R°)}$$

حيث إن = dQ تغير في الحرارة المنتقلة (J أو BTU) و (T) هي الحرارة المطلقة (K° أو R°).

وتستعمل درجة الحرارة المطلقة لأنها تقيس كامل الطاقة الحرارية من مرجعها في درجة الصفر المطلق. وباستخدام هذا التعريف يكون تغير الآنتروبيا لعملية تتقدم من حالة(a) إلى حالة (b) هو

$$S_b - S_a = \int_a^b \frac{dQ}{T} \text{ (J/K° or BTU/ R°)}$$

وتوفر دورة كارنو تفسيراً بسيطاً على وجه التخصص لتغيرات الآنتروبيا. فالعمليتان الأيزوثيرميتان في الشكل 7-A (ب) تختزلان ببساطة إلى التغيرات في Q:

$$S_2 - S_1 = \int_{Q_1}^{Q_2} \frac{dQ}{T_H} = \frac{Q_2 - Q_1}{T_H}$$

مع

$$T_H = T_1 = T_2$$

$$S_3 - S_4 = \int_{Q_4}^{Q_3} \frac{dQ}{T_L} = \frac{Q_3 - Q_4}{T_L}$$

مع

$$T_L = T_4 = T_3$$

والعمليتان الأخريتان هما عمليات أدياباتية وهي بحسب التعريف

$$dQ = 0$$

لذا فإن $S_2 - S_3 = 0$ وكذلك، $S_4 - S_1 = 0$ وهذان المسلكان للآنتروبيا الثابتة تميزان العمليات الايزونتروبية والتي هي أدياباتية وعكوسة.

وتوفِّر الآنتروبيا ودرجة الحرارة المطلقة بديلاً مفيداً لعرض المسالك للعمليات والدورات. ويبدو في الشكل 7-A ب مخطط (T –S) لدورة كارنو باستخدام أرقام الحالة نفسها كما في الشكل 6-A. وتمثل المساحة داخل شكل T –S بصورة عامة الحرارة المنقولة في عملية من الحالة (a) إلى الحالة (b) بصورة الكمية.

$$Q_b - Q_a = \int_{S_a}^{S_b} Tds$$

وهي المساحة في مستوى T-S تحت المسلك من a إلىb.

وفي دورة كارنو يكون تمثيل المساحة على مستوى T-S بسيطاً على وجه الخصوص عندما تكون المساحة مستطيلة كما في الشكل 7-A ب. والحرارة المنقولة في هذه الحالة هي:

$$Q_2 - Q_1 = \int_{S_1}^{S_2} TdS = T_H (S_2 - S_1)$$

المساحة المربعة تحت المسلك 1– 2

ويكون

$$Q_3 - Q_4 = \int_{S_4}^{S_3} TdS = T_L (S_3 - S_4)$$

المساحة المستطيلة تحت المسلك 3– 4

والمساحة الصافية للدورة المغلقة على شكل S– T تمثل ذلك الجزء من الحرارة المنقولة والتي هي متوفرة للشغل في المحرك.

وهكذا ففي دورة كارنو يكون

$$W = \int_{S_1}^{S_2} TdS + \int_{S_2}^{S_3} TdS + \int_{S_3}^{S_4} TdS + \int_{S_4}^{S_1} Td$$

وحيث إن[11]

$$W = \int_{S_1}^{S_2} TdS + \int_{S_3}^{S_4} TdS$$

لذا يكون لدينا

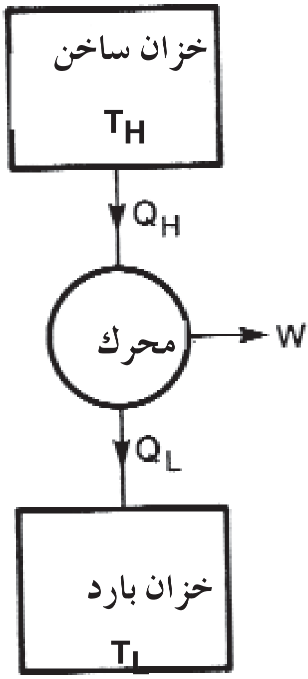
$$W = T_H (S_2 - S_1) - T_L (S_3 - S_4)$$

11 - في متكاملات المسلك المغلق في الشكل 7-A ب.

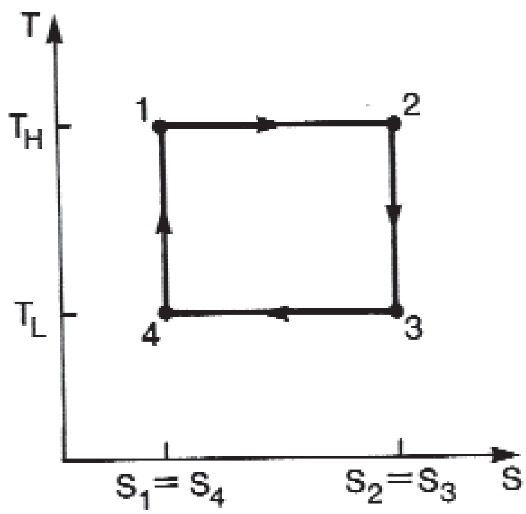
$$\int_{S_2}^{S_3} = \int_{S_4}^{S_1} = 0$$

و

$$\int_{S_3}^{S_4} = \int_{S_4}^{S_3}$$



(أ)



$T_1 = T_2 = T_H$

$T_4 = T_3 = T_L$

(ب)

الشكل A-7: المحرك الحراري لكارنو

(أ) شكل تخطيطي

(ب) مخطط T – S

المساحة على شكل T –S ضمن المستطيل 1–2–3–4

إن تشخيصنا المسبق لمدخل الحرارة (2–1) وخرجها (3 –4) تمكننا بعد ذلك من كتابة الآتي لعملية نقل الحرارة.

الحرارة المدخلة

$$Q_H = T_H (S_2 - S_1)$$

الحرارة الخارجة

$$Q_L = T_L (S_3 - S_4)\ T_L (S_2 - S_1)$$

لذا يكون الشغل المثالي المتوافر

$$W = Q_H - Q_L$$

ومعنى هذا نظرياً أن كل الطاقة المتوافرة في محرك كارنو تستهلك في الشغل (W) وبذلك يكون لدينا إشارة (يساوي) في هذه المعادلة. ويجب أن نلاحظ أكثر من ذلك أن الحرارة (Q_L) المرفوضة في خزان درجة الحرارة الواطئة غير متوافرة بكاملها لأداء شغل حتى في محرك كارنو المثالي. وهذه النتائج تتيح لنا كتابة تعبير بسيط بوجه خاص عن كفاءة كارنوالمثالية للمحرك الحراري. وتعرّف كفاءة كارنو على الوجه الآتي:

$$\eta = \frac{work\ out}{energy\ in} = \frac{W}{Q_H}$$

والنتيجة البسيطة بالنسبة إلى دورة كارنو هي

$$\eta = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{T_H (S_2 - S_1) - T_L (S_2 - S_1)}{T_H (S_2 - S_1)}$$

$$= \frac{T_H - T_L}{T_H}$$

وهذا يمثل الحد الأعلى لأي محرك حراري يعمل بين درجتي الحرارة T_H و T_L.

وهناك عدة أسباب لعدم تمكن أي محرك حراري عملي من إحراز حدود كارنو. والتسرب الحراري من النظام مثل الفقد الحراري بشكل إشعاع هو أحد الأسباب البدهية الذي يؤدي إلى نقصان الطاقة المتاحة. والاحتكاك أيضاً يسبب خسارةً في الكفاءة ومن المفهوم أن هذه عملية لاعكوسة. والعمليات اللاعكوسة بصورة عامة

أكانت بسبب الاحتكاك والاضطراب أو بسبب حالات عدم التوازن الأخرى تمثل الطرق الرئيسة التي تختلف بها المحركات عملياً عن الحالة المثالية. وتمدد البخار في محرك بخاري عملي هو طريقة أخرى. فهذه العملية ليست أيزونتروبية بصورة مثالية أي إنها ليست أدياباتية بصورة كاملة أو عكوسة تماماً في الانضغاط. وسنقارن لاحقاً في هذا الملحق كفاءات المحركات العملية بالمثالية.

واستحسان العمليات اللاعكوسة وكيفية تحول الطاقة إلى أشكال ليست متوافرة لعمل مفيد يعطينا فهم أفضل لماذا لا توجد ماكينة ذات حركة مستمرة (Perpetual Motion) في الواقع مثل هذه الماكينة ستكون قادرة مثلاً على استغلال الطاقة المتحولة بواسطة الاحتكاك إلى حرارة. ويخبرنا القانون الثاني أن مثل هذه الطاقة غير متوافرة لإداء الشغل الضروري لإدامة حركة الماكنة. غير أن هذه الماكنة قد تكون بدل ذلك قادرة على استحصال شغل صافي من خزان بارد (الشكل 7-A (أ)) من خلال نقل الحرارة من الخزان ثم إعادتها إليه. غير أن الطاقة هنا أيضاً غير متوافرة وفي هذه الحالة بسبب مكوثها في خزان درجة الحرارة المنخفضة.

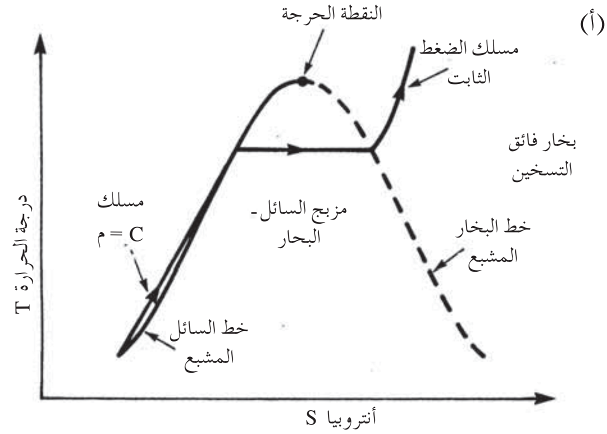
إن عدم توافر الطاقة في الخزان منخفض الحرارة ليس إلا أحد أشكال القانون الثاني، (وهذا يعزو إلى اللورد كلفن 1824 – 1907 وهو فيزيائي بريطاني). إن مضخة الحرارة الحديثة (أو الثلاجة) تُصور إمكانية نقل الطاقة من درجة حرارة دنيا إلى درجة حرارة أعلى فقط بصرف جهد (شغل) صافي.

دورة رانكن: محركات حرارية تستخدم البخار

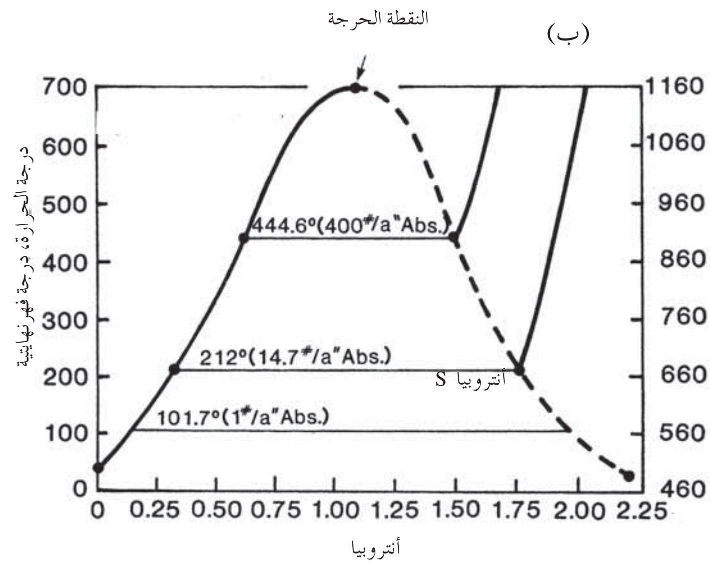
دعنا ننظر إلى الدورة الثيرموديناميكية للآلة المحركة البخارية الترددية (انظر الشكل 3-1). وكما لوحظ في الفصل الثالث فإن هذا المحرك يعمل بواسطة مكبس، لذا فإن وصفاً لها سيوازي وصف دورة كارنو. والآن على أي حال سننظر في عملية من الحياة الواقعية تستخدم مادة شغل حقيقية – بخار – بدل دورة مثالية ومادة مثالية.

كان مخطط p-V للمحرك البخاري قد وضِّح في الشكل 3-2. والدورة الثيرموديناميكية التي تتبعها المسالك في الشكل هي دورة رانكن. ولا يتبع أي من المسالك في دورة رانكن العمليات المثالية لدورة كارنو بدقة، وهناك اثنان من

المسالك لهما عمليات ممتزجة. فالمسلكان 2–3 وكذلك 4–1 هما على التوالي تمدد وانضغاط، لكن أياً منهما لا يمكن أن يسمى أدياباتياً فعلاً وذلك بسبب وجود لاانعكاسية مثل الاضطراب. أما المسلك 1 – 2 فهو انضغاط جزئي وتمدد جزئي مع وجود هبوط بطئ في الضغط يصاحب عملية التمدد عندما يبدأ حجم الاسطوانة بالازدياد عند نهاية عملية دخول البخار. وهناك أخيراً مسلك العادم 3– 4 الذي يسلك تقريباً عملية ضغط ثابت صرفة تقريباً لطرد البخار إلى الجو وذلك بعد جزء بسيط من التمدد (عند انتهاء إزاحة المكبس).



الشكل A-8: الشكل T-S للماء والبخار.
(أ) مسلك مفرد ثابت الضغط. مقتبس من Burghardt (1978).
(ب) القبة البخارية. مقتبسة من E. B.Norris and E. Therkelson,Heat Power, NY.:McGraw – Hill, 1939.



ويبين الشكل 8-A الحالات المختلفة لمادة الشغل أي الماء/ البخار بواسطة خطوط قبة البخار على مخطط .T –S فعلى اليسار في الشكل 8-A أ يوجد خط السائل المشبّع مؤشراً الحدود بين السائل الصرف ومزيج السائل والبخار. أما على اليمين فيوجد خط البخار المشبّع مؤشراً الحدود بين مزيج السائل ـ البخار ومنطقة البخار الصرف المدعوة بمنطقة التسخين الفائق. ويلتقي خطا التقسيم هذان عند قمة القبة البخارية في النقطة الحرجة (الشكل 8-A أ، ب).

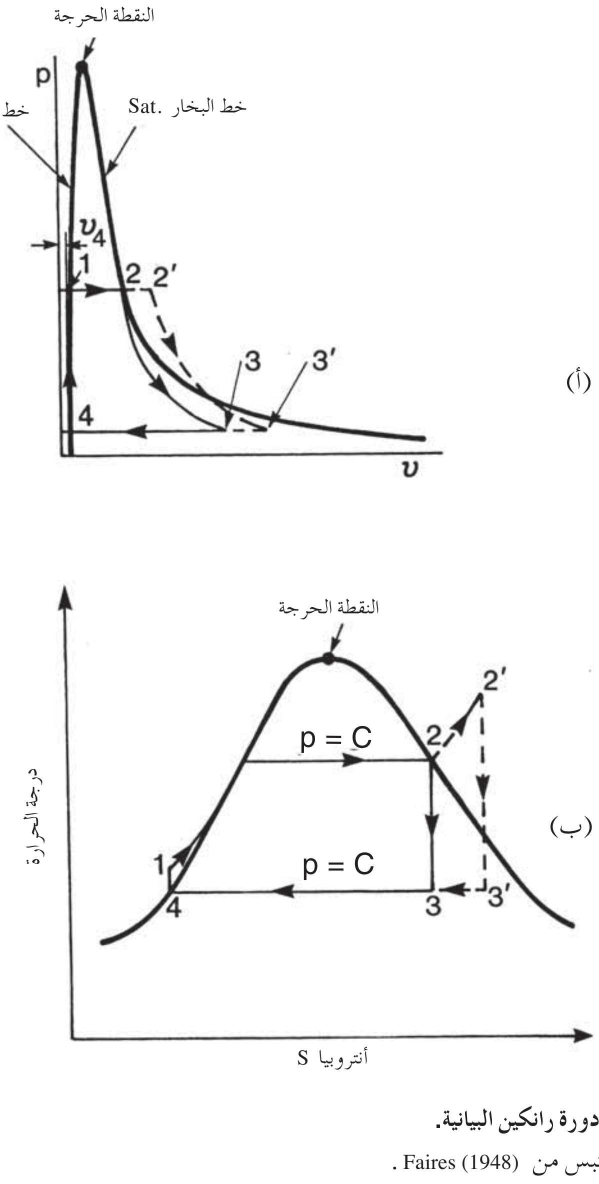
وإذا ما سخن الماء تحت ضغط ستزداد درجة حرارته وأنتروبيته عبر مسلك فوق خط السائل المشبع بقليل على مخطط T-S مباشرة كما يبين ذلك الشكل 8-A أ. فعندما تصل درجة حرارة الماء المضغوط إلى درجة غليانه تبقى درجة الحراة ثابتة عند ذلك فيما تجري إضافة حرارة أكثر ويصبح مسلك T—S خطاً أفقياً. ويستمر هذا المسلك لدرجة الحرارة الثابتة وتزداد الأنتروبيا فقط عندما تضاف الحرارة حتى تصل إلى خط البخار المشبع. وبالإمكان رؤية مسالك مدخل الحرارة لمزيج الماء/البخار عند ضغوط مختلفة (مقاسة بالباوندات على الإنج المربع بالمقياس المطلق، psia) حيث إن المسلك (أ) يمثل P=400 psia وT=444.6°F ويمثل المسلك (ب) P=14.7 psia وT=212°F (الضغط الجوي) أما المسلك (ج) فيمثل T=101.7°F وP=1 psia.

وإذا ما بُرِّد البخار المشبع عند ضغط محدد فسيتبع مسلك رجوع أفقي في درجة حرارة ثابتة عبر القبة البخارية عائداً إلى خط السائل على اليسار.

وإذا ما سخن البخار بعد حالة التشبع البخاري فستبدأ درجة الحرارة مرة ثانية بالارتفاع، كما هو مبيّن في المسلك في الشكل 8-A أ في منطقة التسخين الفائق. ويبيّن الشكل 8-A ب أجزاء المسلك للتسخين الفائق للبخار تحت ضغطي 400 و14.7 psia. وسنرى أن أخذ البخار إلى منطقة التسخين الفائق سيحسن الكفاءة الحرارية للمحطة البخارية.

وتستخدم المحطات البخارية الحديثة (انظر الفصل الثالث) نوعاً مغلقاً من دورة رانكن. ويمكن مقارنة كل من المسالك p—V و T—S لدورة رانكن المغلقة (المبينة في الشكل 9-A) مع المسالك المشابهة في دورة كارنو. إن مسلك مدخل الحرارة لدورة كارنو آيزوثيرمي بمجمله (انظر الشكل 7-A) بينما يبدأ هذا المسلك (1-2)

بالنسبة إلى دورة رانكن بالارتفاع في مستوى T–S فوق خط السائل المشبع بقليل (انظر الشكل 9-A). ويصبح ما تبقى من عملية مدخل الحرارة آيزوثيرمي فقط بعد الوصول إلى درجة حرارة الغليان. وكما لاحظنا فإن مسلك درجة الحرارة الثابت يتقرر بخواص تبخر البخار للضغط الموجود في تحدد المسلك ثابت درجة الحرارة.



الشكل 9-A: شكل دورة رانكين البيانية.

(أ) مخطط p-V مقتبس من (1948) Faires .

(ب) مخطط T-S مقتبس من (1978) Burghardt.

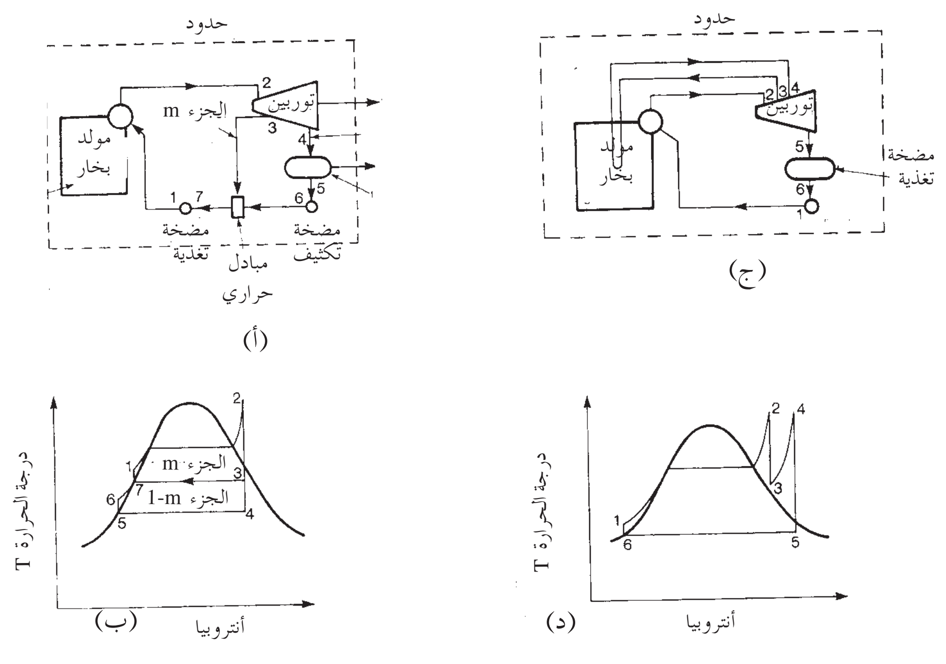
تؤشر النقطة 2 على خط البخار المشبع نهاية مسلك دخول الحرارة T-S وبداية عملية تمدد رانكن. وهذه الطريقة للتمدد هي تقريباً آيزينتروبية (S ثابتة) لذا فهي تسقط على مخطط T—S بصورة شبه عمودية شبيهة بتمدد كارنو المثالي إلى النقطة 3. والمسلك 3-4 يمثل عملية نفث البخار (العادم) والتي نقدر الآن أن نرى أنها عملية ذات مسلك ثابت الضغط وثابت مسلك درجة الحرارة بسبب خواص عملية تكثف البخار. لذا يبدو هذا المسلك الآيزوثيرمي شبيهاً بمسلك نبذ الحرارة في دورة كارنوعلى مخطط T—S. وأخيراً تبين عملية الانضغاط في دورة رانكن المقفلة مسلكاً آيزينتروبيا (عمودياً) قصيراً (1—4) على مخطط T—S ممتداً عبر جزء صغير فقط من تغير درجة الحرارة الحاصل في المرجل. ويختلف عن مسلك الانضغاط في دورة كارنو في عدم ارتفاع درجة الحرارة على المدى الكامل. ويحدث أفضل أداء لهذا المسلك الانضغاطي لدورة رانكن عندما تكون مادة الشغل سائلة بدل أن تكون بخاراً أو مزيجاً من الماء والبخار[12].

ويمكن لدورة رانكن أن تمتد إلى منطقة التسخين الفائق وعادة يجري ذلك من خلال الاستمرار بإدخال الحرارة عند الضغط نفسه ما بعد خط البخار المشبع (النقطة 2 في الشكل 9-A أ). وعندما يجري ذلك في ملفات التسخين الفائق في المرجل يمتد مسلك مدخل الحرارة إلى حالة ضمن منطقة التسخين الفائق للبخار. أما على مخطط p-V كما في الشكل 9-A أ فتمديد مسلك 2 - ´2 ليس إلا خطاً مستقيماً وذلك لأن التمديد فائق التسخين مازال تحت ضغط ثابت. وفي مخطط T-S يرتفع المسلك 2-´2 إلى درجات حرارية أعلى.

وعملية التمدد من حالة التسخين الفائق هي آيزينتروبية تقريباً (المسلك ´2 — ´3). والقيمة الرئيسة للتمديد فائق التسخين (المسلك 2—´2) هي درجة من الزيادة في الطاقة المتاحة للدورة والتي هي أكبر لوحدة مدخول الحرارة من الزِيادة المؤدية إلى حالة البخار المشبع (النقطة 2). وهذه الزيادة في الطاقة المتاحة تُمثل على مخطط T—S (الشكل 9-A ب) بالمساحة المحاطة بالنقاط 2 و´2 و´3 و3. وتبعاً للأسس التي وضعت في ما سبق في هذا الملحق سيزيد هذا من الكفاءة الحرارية للدورة، وبذلك يعطي شغلاً مفيداً أكثر لمدخل وحدة الحرارة والوقود.

12 ـ من الممكن فيزيائياً أن يُضغط مزيج البخار والسائل آيزينتروبياً (مسلك عمودي على مخطط T-S) إلى نقطة درجة حرارة/ ضغط أعلى على أو قريباً من خط البخار المشبع الذي يمكن أن يستمر من عنده مسلك مدخل الحرارة في المرجل. ويسبب العمل مع مزيج السائل ـ البخار صعوبات عملية مثل التآكل والتنقّر للأجزاء الميكانيكية.

والمساهمة المميزة الأخرى نحو تحسين الكفاءة الحرارية لدورة رانكن هي باستخدام المكثِّف. ويمكن فهم تأثير التبريد في كفاءة الدورة من خلال استخدام مخطط . T – S فمن السهل كما في الشكل 9-A ب رؤية أن خفض درجة حرارة العادم ($T_L = T_3 = T_4$) لدرجة حرارة مدخل محددة ($T_H = T_2$) سيزيد من الطاقة المتاحة لأنه يزيد من المساحة المحاطة بمسالك الدورة. وعلى نقيض ذلك فإن المحطات التي تعمل من دون مكثّف ستنفث البخار في درجة حرارة عادم أعلى (T_L) لذا فسيكون لديها طاقة متاحة أقل في الدورة. إن تحسن الكفاءة التي تنجم عن المكثف يمكن فهمها من خلال الضغط كما لاحظنا في الفصل الثالث. وقد أُشير هناك إلى أن زيادة في فرق الضغط (مما يقلل الضغط الخلفي) تنشأ عبر المحرك الذي يدور بالبخار بواسطة الفعل التبريدي للمكثف.



الشكلA-10: تحسينات كفاءة دورة رانكن بواسطة إعادة التوليد وإعادة التسخين

(أ) شكل تخطيطي لمرحلة واحدة في إعادة التسخين.

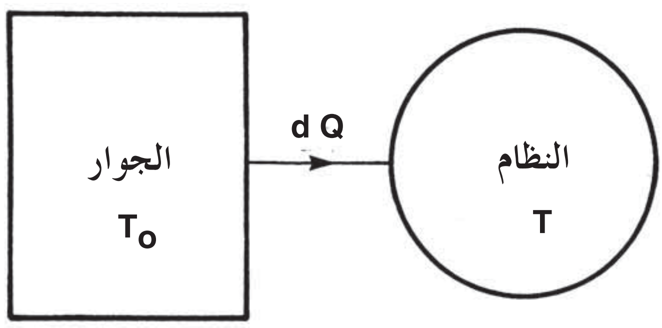
(ب) مخطط T –S لمرحلة واحدة في إعادة التسخين. (ج) شكل تخطيطي لإعادة تسخين بمرحلة واحدة. (د) مخطط T –S لمرحلة واحدة من إعادة التسخين مقتبس من: Burghardt (1978)

هناك عدة وسائل لزيادة الطاقة المتاحة في دورة رانكن. وإحدى الطرق المهمة هي إعادة توليد مادة الشغل وهو ما يبينه تخطيطياً الشكلان 10-A أ وب ويمثل محاولة للتقرب من كفاءة دورة كارنو. وينجز ذلك بواسطة استرداد حرارة التبخر لجزء من مادة الشغل (أشير إليها بالحرف m في الشكل 10-A أ) لإعادة تسخين البقية (m−1) بشكل ماء تغذية إلى المرجل. إن مرحلة واحدة من إعادة التسخين (توجد عادة عدة مراحل في بعض المحطات) يمكن أن تحسن الكفاءة بما يصل إلى 7 في المئة.

وإعادة التسخين طريقة أخرى لتحسين الكفاءة الحرارية. وفي حين يمكن فهم إعادة التسخين على أسس الحس السليم، يمكن كذلك ملاحظة مهمته من خلال مصطلحات كفاءة القانون – الثاني بوضوح على مخطط T-S في الشكل 10-A ج و د. إن إضافة المساحة في المنطقة فائقة التسخين (المسلك 3– 4– 5) ينجم عنه كسب في الطاقة المتاحة (المساحة T- S في الشكل10-A د) وكسب صاف في الكفاءة.

زيادة الآنتروبيا – النتائج الأخرى للقانون الثاني

لخاصية الآنتروبيا (S) تفسير مميز آخر. وهذا التفسير يقول إن الآنتروبيا مقياس لحالة الفوضى لنظام ثيرموديناميكي. ويجري النظر إلى الأنظمة من أي حجم تبعاً لهذه التأملات النظرية أكانت ذات حجم مجهري أو على مستوى الكون كله. ويقال بالنسبة إلى المقياس الكوني أن حالة الفوضى في الكون تتنامى بصورة مطّردة، لذا فإن آنتروبيا الكون تتزايد دوماً.



الشكل 11-A: تغير الآنتروبيا لنظام واحد

دعنا ننظر في نظام واحد كما في الشكل 11-A خشية أن يصبح التعميم واسعاً جداً. لغرض نقل الحرارة إلى النظام من جواره كما في الشكل $dQ > 0$ فإن هذا يعني أن الحرارة تسري إلى النظام ويتطلب $T_0 > T$ لهذا الانتقال للحرارة.

وهذا يعني أن تغير الآنتروبيا في النظام S_{syst} إيجابي.

$$dS_{syst} = \frac{dQ}{T} > 0$$

أما تغير الآنتروبيا في الجوار S_{surr} لهذا الانتقال الحراري فهو:

$$dS_{surr} = -\frac{dQ}{T}$$

وهو كمية سالبة لأن انتقال الحرارة يحدث من الجوار. أما التغير الكلي للآنتروبيا (للنظام والجوار) فهو إذاً:

$$dS_{syst} + dS_{surr} = \frac{dQ}{T} - \frac{dQ}{T_o} > 0$$

وهو كمية موجبة وذلك لأن $l/T > l/T_0$ أما إذا كان انتقال الحرارة بالاتجاه الآخر أي خارج من النظام فسيتطلب ذلك $dQ < 0 \text{ and } T > T_0$

وهما ما ينتج منهما تغير إيجابي شامل في الآنتروبيا ثانية. وهكذا نرى أن الآنتروبيا تزداد بغض النظر عن اتجاه الانتقال الحراري.

إن نتيجة زيادة الآنتروبيا قد عممت بصورة واسعة. فالعمليات اللاعكوسة ضمن النظام مثلاً تؤدي فقط إلى زيادات الآنتروبيا. حتى أن نظاماً معزولاً ليس فيه أي انتقال إلى الجوار يمتلك إما آنتروبيا ثابتة أو أنتروبيا متزايدة: وهي لن تتناقص أبداً. وهذا ما يعبر عنه بالنسبة لآينتوربيا النظام المعزول (dS_{isol}):

$$dS_{isol} \geq 0$$

وهذا ما يدعى بعلاقة كلاوزيوس (نسبة إلى الفيزيائي الألماني ر.ج كلاوزيوس (R. J. Clausius) (1822– 1888). وعدم تساوي طرفي هذه العلاقة بحسب ما يقال ينطبق على الكون بكامله يجسم التعبير القائل إن أنتروبيا الكون في تزايد مستمر.

ولكي نفهم ما يعني هذا كله بصورة أفضل دعنا ننظر في السلوك الحراري على مقياس مجهري مفصل. يتضمن المنظور المجهري للآنتروبيا على مقياس الجسيمات أو لمجموعات من الجسيمات قدراً من عشوائية الحركة ودرجة من مزج لأنواع وسرعة وحركة الجسيمات. لذا نلاحظ في هذا المنظور المجهري عشوائيةً وامتزاجاً متزايدين مع توجه نحو ما يشبه بحراً من الحركة العشوائية متماثل إحصائياً. والكون تبعاً لهذا التفسير الشمولي للآنتروبيا يصبح بصورة متزايدة بحراً من الفوضى من هذا النوع رغم أن المحتوى الكلي للطاقة فيه ثابت (القانون الأول لحفظ الطاقة). والطريقة الوحيدة لجعل هذه الطاقة متاحة تبعاً لهذه النظرية هو من خلال تأدية شغل على جزء من هذا البحر أو أن يكون هناك إطلاق موضعي لطاقة مركزة (مثلما يطلق بحرارة الاحتراق).

وتشدد النظرية المجهرية للآنتروبيا في نظام معزول على تزايد الفوضى أو الاضطراب المتوقع إذا ما صحت نظرية زيادة الآنتروبيا. ويأخذنا هذا المنظور إلى منطقة أخرى ذات مفهوم أصلب جداً ونعني الموارد المعدنية. فقد لاحظ الاقتصاديون وغيرهم أن التراكيز الطبيعية للمعادن[13] في العالم تتشتت نتيجة النشاطات البشرية. وهكذا فإن تراكيز الخامات المعدنية كالنحاس والبلورات الثمينة كالألماس وبقية العناصر تعدّن وتغذى إلى عمليات تصنيع وتباع إلى المستهلكين عبر العالم جميعه. ويجري طرح العديد من المنتجات ذات الأساس المعدني، لتباع وتنتهي في مواقع التخلص من النفايات ممزوجة مع العديد من المعدنيات الأخرى. وحتى عندما يستخدم التدوير الكامل والذي يتطلب مدخولاً من الشغل، سيكون هناك خسارة في كتلة المنتوج المعدني بسبب عمليات التآكل الاعتيادية.

تتلاءم هذه الصورة للتشتت التدريجي للمعادن مع مفهوم الآنتروبيا المتزايدة في كثير من الطرق. هناك أولاً التشتت العشوائي للمادة. الشيء الآخر والمرتبط مع التشتت هو مزج مواد نقية مع كثير من المعادن الأخرى (والمواد العضوية أيضاً).

---

13 ـ إننا نبحث هنا في المعادن طويلة العمر فقط والتي لا يتبدل تركيبها الأساسي نتيجة فعالية الإنسان. وبهذا فنحن نستثني المعادن التي هي مصدر للكيميائيات (مثل الكالسايت والكبريت) التي تخضع لتغيرات كيميائية أثناء التصنيع. كما نستثني أيضاً اليورانيوم والثوريوم التي تخضع لتغيرات ذات طبيعة جوهرية أعمق في التفاعلات النووية أثناء استخدامها كوقود انشطاري، ونستثني أخيراً الوقود الأحفوري الذي يتغير كيميائياً نتيجة الاحتراق.

وكان التشتت والامتزاج من بين العمليات اللاعكوسة ذات العلاقة بالغازات الساخنة في المحركات في القسم السابق. وفي حالة تشتت المعادن كما في حالات خنق أو مزج الغازات، يمكن اعتماد زيادة الآنتروبيا كمقياس لتزايد الفوضى. لذا فإن ما يلاحظ هو أن استخدام المعادن يمثل أيضاً اتجاهاً نحو زيادة الآنتروبيا متماشياً مع كافة عمليات الحفاظ على الطاقة، ويبدو أن كلاهما شيء لا يمكن تجنبه نتيجة النشاط البشري.

والحقيقة أن تجنب عملية الآنتروبيا وهو ما يبدو غير ممكن يؤدي بنا إلى مفهوم آخر ذي عمق وهو – سهم الزمن (Eddington, 1958). وتشير هذه الفكرة إلى أن الأفعال والتفاعلات والفعالية، لما كانت تحدث باستمرار بصورة عامة في الكون فإن الزيادة المستمرة في الآنتروبيا هي بحد ذاتها مقياس لمرور الزمن، حتى أن لاعكوسية هذه العملية تحمل معها الواجهة الأحادية الاتجاه لمرور الزمن.

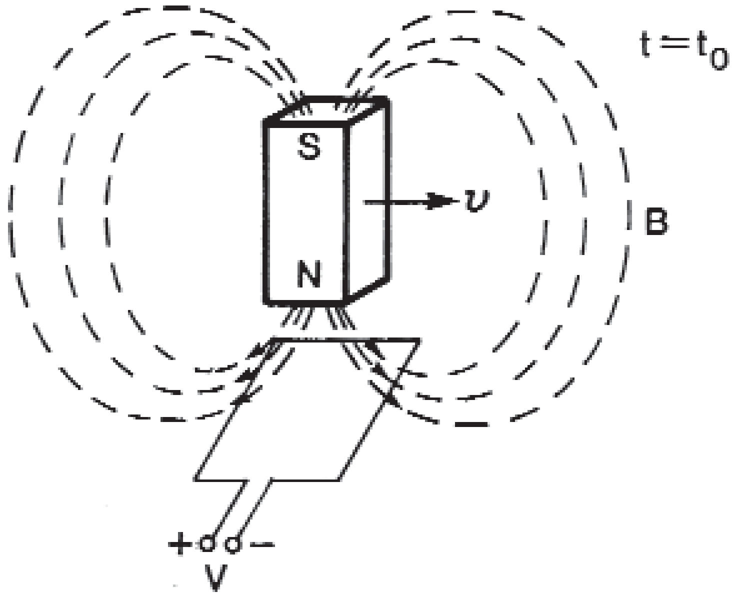
والاستنتاج الذي يمكن أحياناً استخلاصه من توقع الزيادة التي لا يمكن تجنبها للآنتروبيا، هو أن الكون سيعاني في النهاية من موت حراري. وتبعاً لهذا التوسع في النظرية، ستستمر الطاقة الحرارية بالانتشار، مما يؤدي في النهاية إلى نقطة لن يكون من المجدي عندها تركيز الحرارة أو تنظيم المادة أو إنجاز شغل مفيد. وستكون الحياة لحظة الوصول إلى هذه الكارثة النهائية، قد توقفت منذ زمن طويل، وسيكون الكون بارداً ومنتشراً مع انتشار غير نظامي للطاقة والمادة يقارب حاله الآنتروبيا العظمى(Georgescu –Roegen,1971).

التحويل إلى كهرباء

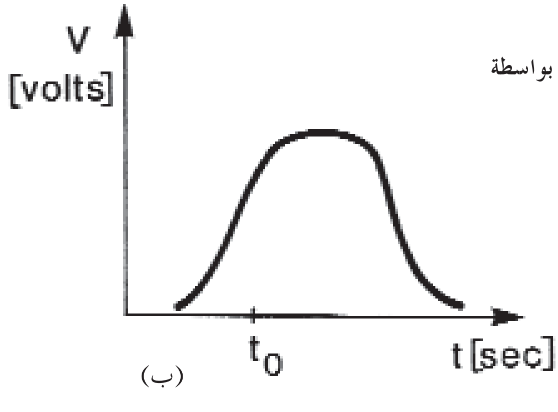
تقوم التوربينات البخارية في محطة كهرباء تقليدية بتدوير المولدات الكهربائية (انظر الفصل الثالث). ويحدث التوليد الكهربائي التقليدي تبعاً لقواعد الكهرومغنطيسية التي جرى صياغتها في القرن التاسع عشر[14]. فتوليد الفولتية

14 ـ بالنسبة إلى مصدر جيد عن تطور النظرية الكهرومغنطيسية انظر (Singer, Holmyard, Hall and Williams, 1958). والمساهمون الرئيسون في هذه النظريات هم أ. م. أمبير (A. M. Ampère) (فيزيائي فرنسي 1775 – 1836) وس. أ . دو كولومب (C. A. de Coulomb) (فيزيائي فرنسي 1736 – 1806) وك. ك. غاوس (K.K.Gauss) (رياضي ألماني 1853 – 1777). و ج. هنري (J. Henry) (فيزيائي أميركي 1797 – 1878) وج. س. ماكسويل (J. C. Maxwell) (فيزيائي اسكتلندي 1831 – 1979(وس. أوريستيد) (C. Orested) (فيزيائي دانماركي 7771– 1851).

الكهربائية مثلاً يفهم من خلال قوانين الحث لفاراداي. ويعزى فهم إحداث مجالات مغنطيسية بواسطة التيار الكهربائي إلى أورستيد وأمبير بشكل رئيسي والقوى على الموصلات الحاملة للتيار في مجال مغنطيسي إلى أمبير وغيره. هذه التأثيرات هي المدخل إلى الفهم الأساسي لعملية توليد الكهرباء الحالية، غير أن قوانين الكهرومغنطيسية هي أُسُس أيضاً لمجالات تكنولوجية رئيسية أخرى بما فيها الاتصالات والبث الإذاعي والحواسيب والعُدد الكهرومغنطيسية واستخدام الآلات.



(أ)



(ب)

الشكل 12-A: احتثاث الفولتية في ملف بواسطة مجال مغناطيسي متغير.
(أ) مغنطيس يتحرك بجانب ملف
(ب) الفولتية المحتثة مقابل الزمن.

وأساس استحداث فولتية كهربائية في ملف لمولد كهربائي تقليدي هو قانون فاراداي للحث الكهربائي. ويبينه الشكل 12-A بأبسط صوره على هيئة مغنطيس يتحرك عبر حلقة (ملف ذو لفة واحدة) سلكية. وإذا ما ربط مقياس للفولتية أو جهاز راسم الذبذبات عبر نهايتي الملف فسيقوم بقياس فولتية تتغير عبر الزمن (انظر المنحنى في الشكل 12-A). وهذه الفولتية محتثة بواسطة المجال المغنطيسي المتغير.

وينسب اكتشاف الحث بصورة رئيسة إلى فاراداري الذي قال إن قوة كهرومغنطيسية (فولتية) تُحتث في ملف بطريقة تتناسب مع سرعة تغير الفيض المغنطيسي المرتبط بالملف زمنياً. ونستطيع أن نتفهم في الترتيب الظاهر في الشكل 12-A ارتباط الفيض المتغاير زمنياً تبعاً لقول فاراداي: عندما يتحرك المغنطيس بجانب الملف على مسارٍ موازٍ له يختلف عدد خطوط المجال المغنطيسي المارّة خلال اللفة. ويبلغ عدد خطوط المجال الذي يمر خلال اللفة حده الأقصى بالطبع عندما يكون المغنطيس مقابل الملف تماماً. ومجموع خطوط المجال المغنطيسي المارة خلال الملف هو الفيض المغنطيسي المرتبط بالملف. لذا فإن ارتباط الفيض في هذه الهيئة يتباين مع مرور المغنطيس بدءاً بالصفر ومرتفعاً إلى الحد الأقصى ليعود ويهبط إلى الصفر.

وقد أفاد فاراداي أيضاً بأن شدة الفولتية المحتثة في الملف، تتناسب طردياً مع عدد اللفات في الملف. لذا فإذا كان الملف لدينا يتألف من دورتين على الحلقة نفسها بدل دورة واحدة فإن التجربة نفسها ستعطي ضعف الفولتية القصوى لقانون فاراداي، كما تعبر عن ذلك المعادلة

$$v = N \frac{dQ}{dt}$$

حيث إن n = عدد دورات ملف

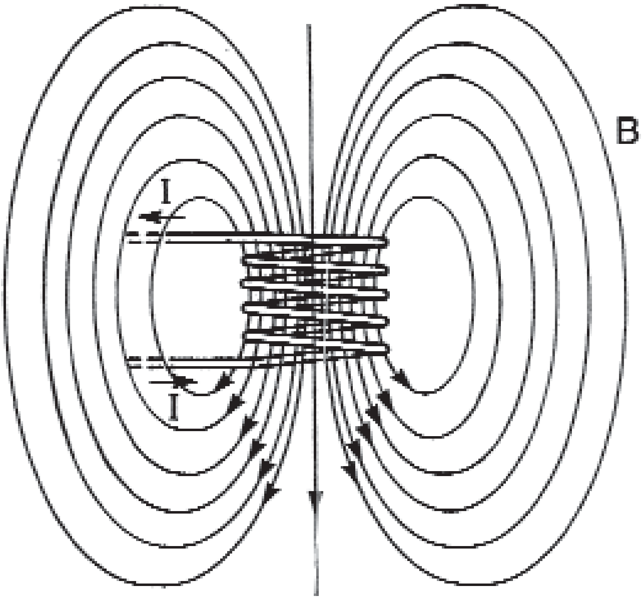
$d\phi/dt$ = سرعة تغير ارتباط كل دورة في الملف مع الفيض المغنطيسي

V = الفولتية المحتثة عبر النهايتين المفتوحتين للملف.

ويحدث احتثاث الفولتية في المولدات الكهربائية التقليدية بدرجة كبيرة حسبما وصفناه إنما مع عدة تحويرات رئيسة. وأحد الاختلافات هو أن الحركة بين المجال المغنطيسي والملف هي دورانية وليست انتقالية (انظر الشكل 3-14). والاختلاف

المهم الآخر هو أن المجالات المغنطيسية لا تزود بواسطة مغانيط دائمية، بل بواسطة مغانيط كهربائية.

والمغانيط الكهربائية تستند إلى قانون أمبير القائل إن سريان التيار الكهربائي يولد مجالاً مغنطيسياً في مستوى عمودي على اتجاه سريان التيار. ويبين الشكل 13-A صورة مبسطة لمغنطيس كهربائي يظهر ملفاً حاملاً للتيار. وتوحي خطوط المجال المغنطيسي التي يولدها سريان التيار في الملف أن هذا يمكن أن يعوض عن مغنطيس ثابت. والمغانيط الكهربائية في الحقيقة تمثل تكنولوجيا عالية التطور. ويمكن توليد مجالات مغنطيسية أقوى بكثير من تلك التي تحدث طبيعياً في المواد المغنطيسية.



الشكل 13-A: مغنطيس كهربائي
يسري التيار في الملف ويولد بذلك مجالاً مغنطيسياً يحيط بالملف

إن أداء مولد التيار المتناوب (A.C) التقليدي لعمله يحدث عندما تتحرك الأقطاب المغنطيسية على الدوار عبر الملفات المدفونة في الجزء الساكن (انظر وصف المولد التقليدي في الفصل الثالث). تتغير قطبية الفولتية المحتثة في كل من ملفات الجزء

الساكن (بين الموجبة والسالبة) عندما تتغير الأقطاب المغنطيسية التي تمر بين شمالي وجنوبي[15]. وهذا التغير يتماشى مع قانون فاراداي لأن ارتباطات الفيض تعكس اتجاهاتها عند مرور كل وجه لأحد القطبين.

وإذا كان المجال المغنطيسي ذا شكل مناسب عند وجوه الأقطاب سيكون شكل الموجة المرتبطة بالفيض بشكل موجة جيبية تقريباً (أي إنها تشبه دالّة جيبية عبر الزمن)، كما يبينه الشكل 14-A أ. وبسبب اعتماد الفولتية المحتثة على سرعة تغير الفيض الزمنية في الملف تكون هذه أيضاً تشابه شكل دالّة جيبية لكنها مزاحة زمنياً. إن التغيرات الجيبية للفيض والفولتية يكرران ذاتهما في فترة زمنية T كما هو مؤشر في الشكل. وهذه الفترة الزمنية مرتبطة بتناوب كامل خلال زوج من الأقطاب (مثلاً N–S-N). وفي أنظمة التيار المتناوب تكون هذه الفترة عادة $\frac{1}{6}$ من الثانية وتكون ذبذبة التناوب 60 هرتز (دورة في الثانية).

وتخبرنا نظرية الكهرباء الأساسية أن القدرة الكهربائية لمولد في أي لحظة[16] هي حاصل ضرب الفولتية في التيار عند تلك اللحظة. ولدقة أكبر فإن القدرة الكهربائية التي ينتجها مولد كهربائي هي :

$p = v \cdot i [\text{watt}]$

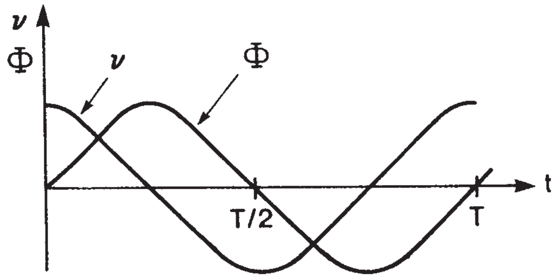
حيث إن $P = P(t)$ هي القدرة اللحظوية التي تولدها ملفات المولد إلى الدائرة الخارجية مقاسة (بالواط) وإن $v = v(t)$ وهي الفولتية اللحظوية عبر نهايتي المولد مقاسة (بالفولت) وإن $i = i(t)$ وهو التيار اللحظوي الساري خلال نهايتي المولد إلى الدائرة الخارجية (أمبير). وبإمكاننا فهم أسس هذه المعادلة البسيطة إذا ما أدركنا طبيعة كل من الحدين في الناتج أي $v.i$. فالفولتية تمثل الطاقة الكامنة لأداء شغل على شحنة كهربائية[17] في حين أن التيار يمثل الوتيرة التي تسري بموجبها الشحنة. لذا فإن

15 ـ للمجالات المغنطيسية اتجاهات ترتبط بها. وعادة ما يسمى اتجاه المجال إيجابياً عندما تكون الخطوط منبثقة من القطب الشمالي.

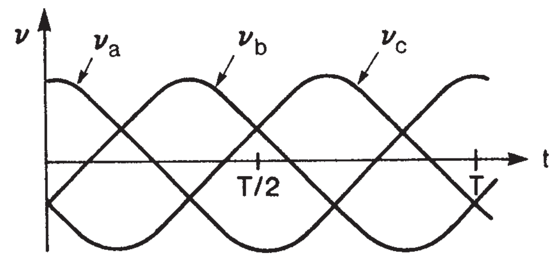
16 ـ القدرة الكهربائية هي الوتيرة الزمنية لتوليد الطاقة الكهربائية في لحظة محددة من قبل المولد.

17 ـ إن التعريف الدقيق للفولت هو الشغل المنجز في تحريك شحنة كهربائية مقابل قوى كهربائية للتنافر تولدها شحنات أخرى. ووحدة الفولت في نظام MKS يمثل التغير في الجهد الكهربائي عندما ينجز 1 جول من الشغل مقابل قوى كهربائية ساكنة (إلكتروستاتية) تبلغ 1 كولومب من الشحنة.

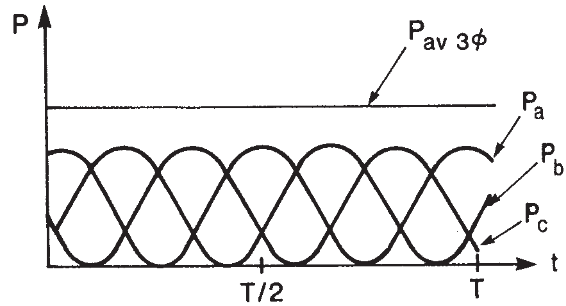
حاصل ضرب $v.i$ هو الوتيرة التي ينفذ بها الشغل أو يجهز بواسطة المولد إلى حمل كهربائي مثل محرك كهربائي. غير أن وتيرة الشغل تبعاً لتعاريفنا في البداية هي على أي حال القدرة.



(أ)



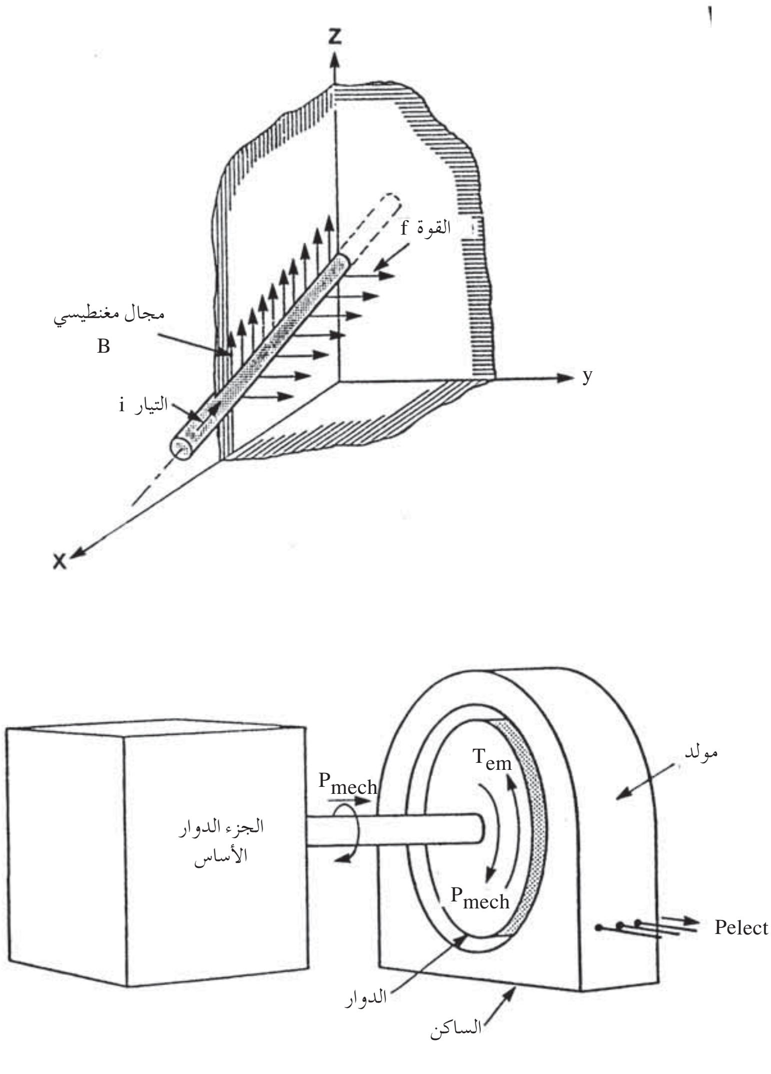
(ب)



(ج)

الشكل 14-A: أشكال موجات مولد التيار المتناوب عبر الزمن
(أ) فيض القطب المغنطيسي ø مقابل الزمن.
(ب) الفولتيات ثلاثية الأطوار مقابل الزمن.
(ج) القدرة ثلاثية الأطوار مقابل الزمن.

ونستنتج عند التفكير بعمل المولد أنه يزود الطاقة فقط إلى دائرة خارجية عندما يسري التيار خلال نهايتي الملف أي إنه لن يجهز أي قدرة (أو طاقة) باحتثاث الفولتية فقط. ولما كان سريان التيار يشير إلى انتقال الطاقة الكهربائية خارج المولد نستطيع



الشكل A- 15: التفاعل البيني للمحرك الأولي/ المولد

(أ) القوة المغنطيسية في موصل حامل للتيار

(ب) عزم الليّ والدوران. مقتبس من: .Elgerd (1978)

الآن أن نتساءل عن علاقة التيار بتحويل الطاقة في المولد من المحرك الأولي.

إن سريان التيار في ملفات الجزء الساكن يولد مجالاته المغنطيسية الذاتية كما يبين ذلك الشكل 13-A. وهذا المجال المغنطيسي للجزء الساكن ذو أثر مضاد للمغانيط الكهربائية في الجزء الدوار. ويبين الشكل 15-A أ قوى التأثير هذه في الموصلات الحاملة للتيار. ويسبب المجال المغنطيسي الناجم عن تيار ملف الجزء الساكن في مولد التيار المتناوب قوى على الموصلات الحاملة للتيار في لفيفات (أقطاب) الجزء الدوار. وتميل هذه القوى على لفيفات الجزء الدوار إلى معاكسة حركة أقطاب الدوار لذا فهي تنشئ عزم الليّ معاكس لعزم الليّ الميكانيكي الذي يزوده المحرك الأولي (انظر الشكل 15-A ب). وتلاحظ هذه القوة المضادة في كافة أنواع الأنظمة الكهرومغنطيسية ويجري توقعها عموماً بواسطة قانون لينتز[18]. فالمحرك الأولي (التوربين البخاري) يجب أو يزود شغل ميكانيكي مقابل مثل قوى الليّ هذه المضادة في التوليد الكهربائي.

تحويل الكهرباء

يجب بعد توليد الكهرباء نقلها وتوزيعها. والوسائل التقليدية للنقل هي الخطوط الهوائية (أسلاك سميكة) أو كبلات مدفونة تحت الأرض. وكلتا الوسيلتين للنقل تسبب خسائر في الكهرباء عبر المُوصلات.

وقد أدرك العاملون على تطوير التكنولوجيا الكهربائية في مراحلها الأولى أن الخسائر تقل عند تشغيل خطوط النقل بفولتيات أعلى. ويمكن تفهم سبب هذا من اعتبارين بسيطين. الأول نتيجة قانون القدرة الكهربائية كما جرى وصفه، وهو أن القدرة تساوي الفولتية مضروبة في التيار. لذا فكلما زادت الفولتية المستخدمة ولأي قدرة يجري نقلها كلما كان التيار المطلوب أقل، بنسبة عكسية مع الفولتية. فإذا أردنا مثلاً أن ننقل القدرة عند ضعف الفولتية (v) سنجد أن التيار المطلوب (i) لنقل أي عدد محدد من الواط (p) هو النصف. الشيء الثاني هو أن الخسارة في أي ناقل تختلف مع

---

18 ينص قانون لينتز (Lenz Law) على أن الفيض المغنطيسي المتغير زمنياً يستحث فولتية في الملف وتقوم الفولتية بإنتاج تيار في الملف ويتدفق التيار دائماً بحيث يعاكس تغير الفيض المغنطيسي الذي يستحث الفولتية (اعتماداً على الفيزيائي الروسي H. F. E. Lenz ـ (1804 - 1864) .

مربع التيار[19] الذي يسري في الناقل، لذا فإن الخسائر تتناقص بصورة تربيعية مع الفولتية المستخدمة لخط النقل الكهربائي. وهكذا فإذا ضاعفنا الفولتية ستقلل الخسائر إلى الربع.

والمحولة الكهربائية هي وسيلة الحصول على فولتيات عالية لغرض النقل بخسائر قليلة[20] (الشكل أ.16). وتغير المحولة الفولتية والتيار المولدين إلى فولتية أعلى وتيار أقل. ويجري نقل القدرة الكهربائية خلال المحولة كما يبينه الشكل أ.16 وذلك بخلاف بعض الخسائر القليلة في المحولة.

تعمل المحولات على قاعدة الحث رغم أنها تُستخدم بطريقة مختلفة عمّا جرى وصفه في حالة المولدات. فالمحولة مثلاً لا توجد فيها أجزاء متحركة، بل تقوم بدل ذلك باستخدام مجالات مغنطيسية تتغير زمنياً، يولدها تيار متناوب وذلك بواسطة احتثاث الفولتية. لذا أصبح من الضروري استخدام نظام التيار الكهربائي المتناوب لتيسير استخدام المحولات. ويختلف مقدار الفولتية المحتث عبر الملف الثانوي (v_2) مباشرة تبعاً لفولتية التيار المتناوب (v_1) الأولية ويعتمد مقدارها على نسبة عدد لفات الملف الثانوي إلى عدد لفات الملف الأولي كما يعبر عن ذلك في

$$v_2 = \frac{N_2}{N_1} v_1$$

حيث تكون N_1= عدد لفات الملف الأولي

N_2 = عدد لفات الملف الثانوي

---

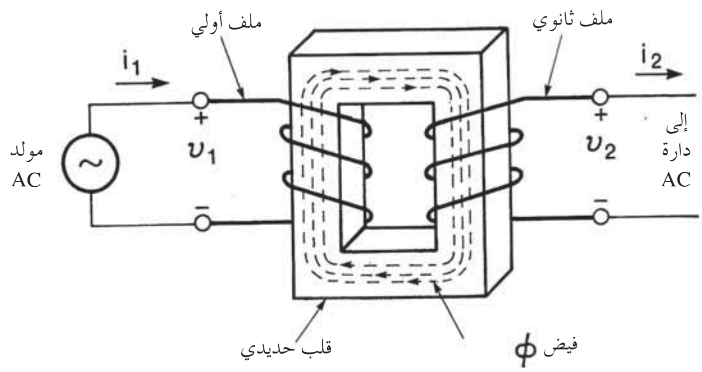
19 يخبرنا قانون أوم أن هبوط الفولتية (تغيرها) عبر طول من الناقل هي $v_R = ir$.

حيث إن i = التيار الذي يمر خلال المقاومة

r = مقاومة الطول المحدد من الناقل

ويخبرنا قانون القدرة الكهربائية أن القدرة المسلمة (المفقودة) على طول الناقل هي $P_R = v_R . i = i^2R$

20 طبّق فاراداي نظريته عن الحث على كل من المولد الكهربائي وعلى نوع من المحول عام 1831. غير أن معظم الكهرباء في عصوره الأولى كان من نوع التيار المستمر (DC) لذا لم يجرِ تطوير فكرة استخدام المحولات حتى زمن متأخر في القرن التاسع عشر وذلك بعد تطوير مولدات التيار المتناوب من قبل و. سيمنز (W. Siemens) (مهندس ألماني 1816– 1892) وغيره. ويرجع الفضل في إدخال أنظمة التيار المتناوب في الولايات المتحدة إلى جورج وستنغهاوس (George Westinghouse) وهو مهندس وصناعي أميركي عاش في الفترة (1914 – 1846).



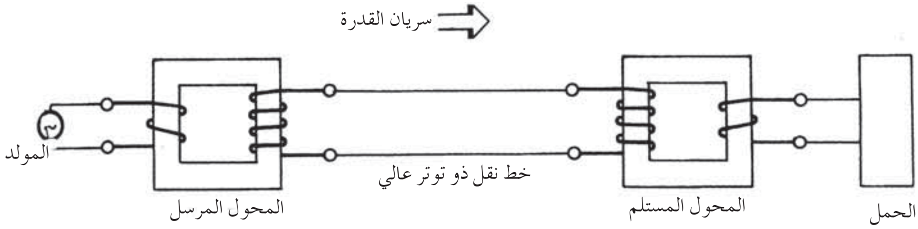
الشكل 16-A
محول كهربائي مثالي
لسريان التيار المتناوب حيث إن $P_{out} = V_2 i_2$ ،$P_{in} = v1i1$
وتكون $P_{out} = P_{in}$ في حالة كون الخسائر صفرية. مقتبسة من M. El – Hawry, Electrical Power Systems – Design and Analysis, Reston, VA, 1983.

وهذا يتبع قانون الحث وهكذا فإن مقدار الفولتية المحتثة في ملف يتناسب مع عدد اللفات في الملف. هذه المعادلة تعبر عن تحويل الفولتية وستكون الحالة رفع الفولتية إذا ما كان

$$\frac{N_2}{N_1} > 1$$

أو إنها ستكون خفض الفولتية إذا ما كان

$$\frac{N_2}{N_1} < 1$$



الشكل A - 17:

خط نقل للتيار المتناوب أحادي الطور

وفي حالة المحولة المثالية المبينة في الشكل 16-A نرى ملفين ملفوفين على القلب الحديدي المغلق نفسه. فالملف الأولي (أو الابتدائي) على اليسار مرتبط بالمولد الذي يجهز فولتية التيار المتناوب (v_1) والتيار (i_1). ويحدث التيار الأولي المتناوب i_1 فيضاً مغنطيسياً متناوباً (ø) يتركز في القلب الحديدي[21]. ويربط الفيض المغنطيسي المتناوب الملف الثانوي ويقوم تبعاً لقواعد الحث باحتثاث فولتية فيه (v_2). وإذا كان الملف الثانوي مرتبطاً مباشرة فسيسرى تيار (i_2) خارجاً من الملف الثانوي وستسري الطاقة بشكل تيار متناوب خلال المحولة. وتستخدم معظم المحولات الكهربائية ملفات منفصلة لا يوجد أي تماس كهربائي بينها بل تعتمد بالأحرى على الحث المغنطيسي.

ويصور الشكل 17-A دوائر خطوط نقل التوتر العالي (الفولتية العالية). وتمتلك المحولة عند الجهة المرسلة (المغذاة من قبل المولدة) عدداً أكبر من اللفات في الملف الثانوي مما فيها على الملف الأولي لذا فهي توفِّر رفع الفولتية. وهناك عند جهة الاستلام خفض للفولتية بسبب امتلاك الملف الأولي المرتبط بخط نقل القدرة لفات أكثر. وإذا ما كانت نسبة رفع الفولتية في هذه الدورة 1: 10 فستكون الخسارة في خطوط نقل القدرة $\frac{1}{100}$ (واحد في المئة) لما كانت عليه من دون رفع الفولتية.

21 تعتبر المواد (مثل الحديد) التي يمكن أن تتمغنط عندما توضع بجوار مغنطيس دائمي أو بجوار ملف يحمل تياراً بالمواد عالية النفاذية للفيض المغنطيسي. وعندما تسري خطوط المجال المغنطيسي خلال مسار يتألف من مثل هذه المواد يصبح الفيض المغناطيسي مركزاً. ويقوم القلب الحديدي في المحولات بحصر خطوط المجال المغنطيسي خلال مسار يتألف من مثل هذه المواد وبذلك يصبح الفيض المغنطيسي مركزاً. ويقوم القلب الحديدي في المحولات بحصر الخطوط المغنطيسية بحيث يتم الحد الأقصى لربط الفيض. ويستخدم الحديد كذلك في المولدات لتوجيه الفيض المغنطيسي.

المراجع

الأسس الثيرموديناميكية

جرى ترتيب هذه الكتب حسب تدرج تعقيدها

Krenz, J. H. Energy, *Conversion and Utilization*. Second Edition. Boston, MA:Allyn & Bacon, 1984.

كتاب مرجعي أولي لطلاب البكالوريوس للعلوم الفيزيائية.

Severns, W. H. and H. E. Degler. *Steam, Air and Gas Power*. New York: Wiley, 1948.

Faires, V. M. *Theory and Practice of Heat Engines*. New York: Macmillan, 1948.

استُخدم الكتابان المرجعيان من قبل طلاب مرحلة البكالوريوس في الهندسة.

وجرى اختيارهما بسبب المادة الوصفية سهلة القراءة عن المحركات الحرارية والأشكال المرشدة. وقد جرى اقتباس عدد من هذه الأشكال.

Burghardt, M. D. *Engineering Thermodynamics with Applications*. New York: Harper & Row, 1978.

كتاب مرجعي حديث لطلاب البكالوريوس في الهندسة.

Van Wylen, G. J. and R. E. Sonntag. *Fundamentals of Classical Thermo dynamics*. New York: Wiley, 1976.

كتاب مرجعي حديث لطلاب الدراسات العليا الهندسية.

قانون الآنتروبيا ومتضمناته الفلسفية

Georgescu- Roegen, N. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, MA:Harvard University Press, 1971.

Eddington, A. *The Nature of the Physical World*. Ann Arbor (paperback):University of Michigan Press, 1958.

Weinberg, A. M. «Avoiding the Entropy Trap.» The Bulletin of the Atomic Scientists: October, 1982.

الكهرومغنطيسية والكهرباء

Singer, C. J [etal.]. *History of Technology: The Industrial Revolution*. Vol. 4. Oxford: Oxford University Press, 1958.

(A summary of the development of the theory of electromagnetism in the nineteenth century). Elgerd, O. I. *Basic Electric Power Engineering*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1978.

An introductory textbook about the Principles of electrical machines for electrical engineering students.

الملحق ب

وضع معايير لقواعد السلامة والصحة

للمجتمع الحق في اختيار نوع تكنولوجيا الطاقة التي يتبناها. غير أن اختيار منافع تكنولوجيا محددة يعني تقبل مخاطر محددة أيضاً. وقد بحثنا بعض المخاطر المتعلقة بتكنولوجيات التوليد بحرق الأحفوريات وبالتوليد النووي. غير أن قضية المخاطر تثير سؤالين آخرين أكثر عموميةً لا بل إنهما فلسفيان. أولهما: كيف نقيّم المخاطر؟ أي كيف نحدد المخاطر ومن ثم نحللها إلى عوامل الكلفة والمنفعة؟ والذي يجب أن لا يغيب عن البال أن الأمر لا يقتصر على وجود كلفة في الخطورة، بل إن تجنب الخطورة مكلف أيضاً وقد لا نكون في بعض الأحيان مستعدين لتحمّل هذه الكلفة. والأمر الثاني هو من سيقرر – مسؤولون حكوميون أم تكنولوجيون أم الجمهور بصورة عامة أو مزيج من نوع ما – ما يجب أن يدفعه المجتمع وتبعاً لأي معايير؟ وقد تكون الاستجابة لهذه الأسئلة ذات أهمية حاسمة في صنع القرار في ما يتعلق بسياسة الطاقة. قد لا تكون ممارسة اختيار تكنولوجيات الطاقة مدركة أو ديمقراطية من دون بعض التحليل لطريقة تحديد الخطورة ومن دون اختيارات نابعة عن معرفة الإجراءات البديلة.

تقييم المخاطر

ما هي الخطورة وما هي المنفعة؟ من الواضح أن بعض الأعمال والفعاليات التي تعرّض الحياة أو أعضاء الإنسان للخطر مثل مناولة الفضلات النووية تحتوي على عامل خطورة. أما الأعمال التي تحسّن حياة الناس – مثل كهربة الأرياف – فتقدم بعض المنفعة. غير أن الأفراد لن يتفقوا دائماً على أن أحد الأفعال يمثل خطورة وأن الآخر يحمل معه منفعة. والحقيقة هي أن حدثاً ما سيحمل معه ما قد يعتقده البعض

خطورة في حين يعتقده الآخرون منفعة. ومن الصعوبة تحديد ما هي الخطورة ومن الأصعب تحديد كلفة الخطورة أو مقدار ما تستحقه المنفعة. ومع ذلك فإن هذا النوع من التقييمات هي جزء – والبعض يقول إنها يجب أن تكون جزءاً – من محاولة صياغة سياسة الطاقة. ويجب أن يكون المجتمع قادراً على تحليل المترتبات الكامنة في خياراته. وقد سعى صنّاع السياسة نتيجة ذلك إلى البحث عن طرق لتقدير وتقييم الخطورة والمنفعة.

يعود أصل هذا الجهد في التقدير والقياس الكمي إلى المفاهيم المنفعية للقرن التاسع عشر. فقد اعتقد المفكرون النفعيون أن السعادة ذاتها يمكن قياسها من خلال نوع من الاجراءات الموضوعية. وإذا كان بالإمكان القيام بمثل هذا التحديد كما فكر بعض الاقتصاديين آنذاك، فسيكون بإمكان صناع القرار احتساب مقدار السعادة الناجمة واختيار الأفعال التي ينجم عنها أكبر قدر من السعادة، وسيكون اتخاذ القرار سهلاً – قضية حسابية وحسب. وهذا بالطبع قد وُضع بطريقة تبسيطية وليس بسيطة، غير أن الرغبة لإيجاد مقاييس كمية يبقى قائماً ولسبب جيد، فمن دونها سيكون اتخاذ القرار مستنداً إلى معايير عشوائية واعتباطية.

ومهما كان الأسلوب الذي يستخدمه متخذو القرار في قضايا الكلفة – المنفعة فعليهم أن ينطلقوا من حقيقتين:

السلامة الكاملة أمر لا يمكن بلوغه.

إن المصادر المجتمعية – التمويل والجهد العملي ورأس المال والمواد الخام وما إليه – محدودة. والنتيجة هي أن المجتمع يجب أن يحدد مستوى السلامة الواجب تحقيقه، ويجب توزيع الموارد بين الادعاءات المتنافسة. وهذا ما يعني في بعض الحالات أن يختار المجتمع بذل الموارد لتعزيز السلامة في حقل معين وليس في حقل آخر.

وقد تبنى مسؤولو حكومة الولايات المتحدة في اتخاذ قراراتهم أسلوباً يمكن وضع خطوطه العامة بالطريقة التالية (مقتبسة من: Hiskes and Hiskes, 1986).

شخِّص المشكلة وقُم بصياغة أهداف السياسة

انظر في سبل بدائل في العمل
حدِّد المترتبات (الإيجابية والسلبية) لكل بديل
حلِّل احتمالية كل مترتب
حدِّد الكلف والمنافع لكل مترتب
اختر البديل الأفضل
إنما كيف سيجري تحليل الكلف والمنافع؟

تحليلات الخطورة – الكلفة – المنفعة

لكي يجري تقييم الادعاءات المتنافسة بطريقة منهجية، اتفق صنَّاع القرار على اعتماد طريقة كمية تدعى تحليل الكلفة – المنفعة (CBA)، أو تحليل الخطورة – الكلفة ـ المنفعة (RCBA) وهو أسلوب مماثل لكنه متميز ويجري تطبيقه عندما تضع سياسة الاختيار عامة الناس في خطر. ويقوم المهندسون أو الاقتصاديون في طريقة CBA بوزن كلفة وضع و/ أو التحكم بنوع محدد من التكنولوجيا مقابل منافعها. ومع ازدياد درجة التحكم تهبط درجة الخطر غير أن كلفة التحكم تزداد. لذا فإن الهدف هو الوصول إلى الكلفة الكلية المثالية (الحد الأدنى للكلفة). ويجري اعتبار المنافع والكلفة في طريقة CBA على أساس تجاري وتقاس بوحدات للعملية قياسية.

وتستخدم طريقة RCBA في عدة حالات الحسابات الأولية نفسها لطريقة CBA لكنها تقوم بوزن المتباينات غير التابعة للسوق، وتحاول في الأغلب أيضاً أن تدخل في حساباتها كلفة المخاطر المترتبة على حياة الإنسان وصحته وسلامته.

ويوضع لهذه المتباينات المتعلقة بالمخاطر مقدار كمي باستخدام المصطلحات التابعة للسوق، أو على أساس آخر اعتماداً على الاختلاف في منهجية RCBA الذي يختاره القائم بالتحليل، وعادة ما تعتبر عوامل الخطورة على أسس احتمالات حدوثها، للوصول إلى الكلفة الكلية المتوقعة.

ورغم أن كل مشروع تكنولوجي يتضمن لا محالة، درجة من عدم الموثوقية في مراحله الأولى، إلا أن CBA نوع من التحليل المباشر عندما نفكر في استخدام أحد الأمثلة التقليدية، مثل تقييم كلف ومنافع إنشاء طريق سريع. ويستطيع المحللون في

هذه الأحوال تقدير كلفة البناء وقيمة المنافع الكلية، ويستطيعون مقارنة هذه الكلف والمنافع مع الخيارات الأخرى لاستخدام الموارد المالية. وتعطي التقديرات النقدية حساً متكاملاً. فكلفة بناء الطريق وتمويله وصيانته تقدر بطريقة مباشرة. ومن الواقعية أيضاً وضع قيمة نقدية على المنافع بما فيها التحسينات الاقتصادية الممكنة خلال نظام نقل أفضل. ويستخدم المحللون معلومات تجريبية، فتأثير مثل هذه المشروعات قد لوحظ من قَبْل وهي واضحة نسبياً.

والصعوبة في RCBA هي وزن كل عوامل الكلفة. فكلفة ومنافع التكنولوجيا لا تعير ذاتها لتقييم كمي محدد بسهولة في العديد من الحالات، كما إن بعضها في الواقع لا يمكن تقييمه بأي صورة أبداً. فكر في قضية التلوث الناجم عن محطات الكهرباء التي تستخدم الوقود الأحفوري. فالكلفة الممكنة للعطب الذي يصيب الممتلكات يمكن حسابها على أساس نقدي رغم أن القيمة التي سيختارها المحلل قد تختلف اختلافاً كبيراً اعتماداً على احتمالية إضافة بعض العناصر المثيرة للجدل مثل منع الأمطار الحامضية وتنظيف ما تتركه من آثار. فأولئك الذين يرون أن المطر الحامضي نتيجة مباشرة لتوليد الكهرباء من الوقود الأحفوري قد يريدون زيادة قيمة ضرر الممتلكات الكامنة بدرجات مرتبية مقارنة بشخص أقل اقتناعاً من كون المطر الحامضي سبب ذلك. ويتوقع أن تختلف الكلفة المقدرة أيضاً اعتماداً على مدى التحكم الذي يعتبر ضرورياً.

غير أن قضية الضرر الحاصل في الممتلكات المادية أقل حساسية من الأوجه الأخرى لتلوث الهواء. فما هي الكلفة على سبيل المثال إذا ما شعرنا أن تلوث الهواء قد يدمر تمثالاً حجرياً موضوعاً في العراء؟ ربما يكون بإمكاننا وضع تقدير غير واضح المعالم على أسس المقارنة بأسعار مزادات القطع الفنية، رغم عدم إمكانية تعويض تلك القيمة التي تمثل خسارة مَعْلم جمالي فريد.

الأهم من ذلك كيفية احتساب الأثر في صحتنا وحياتنا؟ علينا لكي نتعامل بصورة كاملة مع آثار التلوث أن نضيف الصحة والسلامة إلى التحليل. إنما، كيف نقدر القيمة النقدية لحياة الإنسان ومعاناته؟ لقد حاول بعض الاقتصاديين والمهندسين وضع مثل هذه القيم. الأكثر من ذلك هو أن المحاكم تمنح تعويضات نقدية لأولئك الذين عانوا

وقع التكنولوجيا – وهي ممارسة نعتبرها بصورة عامة مقبولة[1]. ومع ذلك فإن هذه الحسابات عرضة لتباينات واختلافات كبيرة جداً من قبل نفس الناس الذي ينفذون حسابات .(Rhoads, 1980) RCBA إذ إنهم في الحقيقة يستخدمون وحدات قياس مختلفة. ففي حين يضع البعض قيمة نقدية على حياة الإنسان يقوم الآخرون بقياس الكلفة بمصطلحاتها أي الوفيات الإضافية لكل مئة ألف شخص مثلاً. ولما كان للكلف والمنافع الأخرى قيم نقدية متميزة فسيؤدي هذا إلى مقارنات صعبة حيث يجري وزن الوفيات مقابل الدولارات.

يحاول بعض المحللين لغرض تبسيط المقارنة الوصول إلى قيمة نقدية مناسبة للحياة، وهو ما يدعوه الاقتصاديون مقاربة رأس المال الإنساني لتحقيق RCBA. غير أن فعل ذلك يثير بالطبع أسئلة أخلاقية. فهل إن قيمة الإنسان اقتصادية مجردة؟ وهل سيجري قياسها كمجموع ما يتوقع أن تحصل عليه وحسب ـ وذلك لنعطي مثلاً على أحد أنواع القياس المستخدمة الآن؟ وهل نستطيع مثلاً القول إن مشروعاً يمكن أن يقتل مئة إنسان ويصيب ألفاً آخرين، له قيمة إنسانية لا تساوي إلا مجموع أيام العمل المفقودة وأجور المستشفيات وبقية الخسائر المالية؟ القليلون فقط سيتفقون على أن هذه هي القضية، والحقيقة أن أي قياس للحياة الإنسانية من هذا النوع ربما يبدو من أول وهلة منافياً للمعايير الأخلاقية.

تعتبر الكلفة الإنسانية المتأصلة في أي تكنولوجيا للطاقة قضية يصعب إلى حد ما وضع حل مناسب لها. وهذا ما يجعل محللي القرارات الذين يتوقع منهم تقييمها يتغاضون عنها. وقد حاول البعض إقناعنا بأن إعطاء أي قيمة للكلف الوهمية غير التجارية خطأ مبدئي، والحل الذي يقترحونه هو إجراء RCBA ويشمل العناصر القابلة للتقييم الكمي فقط. ويصرون على عدم إمكانية الحصول على دراسة موضوعية ومحايدة القيمة وغير متحيزة إلا من خلال تجنب الكلف الإنسانية[2]. إنما هل هذه مقاربة أفضل وأكثر عدالة في الحقيقة من تقييم يشمل الرأسمال الإنساني؟

---

1 ـ تمنح المحاكم وشركات التأمين تعويضات نقدية عن الإصابات وحالات الوفاة. غير أن ذلك مختلف عما نبحثه هنا. فما تمنحه المحاكم يمثل تعويضاً بعد الحدث. أما رأس المال الإنساني في RCBA فيمثل محاولة لوضع قيمة تابعة للسوق أو فعلية على حياة الإنسان ومعاناته قبل أن تحدث.

2 حول انتقاد الدراسة محايدة القيمة، انظر على وجه الخصوص Schrader – Frechette, 1985 والفصول 3 إلى 6.

هناك أسئلة حرجة تثيرها دراسات محايدة ـ القيمة. فما يتضمنه مفهوم مثل هذه الدراسة هو فكرة أن الحقائق والقيم يمكن فصلها بصورة واضحة، وأن بإمكان RCBA التعامل فقط مع الحقائق الموضوعية، وذلك ما يجب أن تقتصر عليه. وقد تساءل العديد من الفلاسفة بشدة إذا ما كان بالإمكان القول بوجود ثنائية منفصلة للقيمة الحقيقة في RCBA أو حتى في العلوم (Schrader- Frechette, 1985 and Michalos, 1980) . فالعلم يتعامل فعلاً مع الحقائق غير أن هذه الحقائق عرضة للتغيّر والتقييم مع تغير المعلومات. ولو أن العلوم تعاملت في الحقيقة مع الحقائق الراسخة فكيف يمكن أن تكون هناك نظريات جديدة تحاول تقييم المعلومات وتوضح الإصابة؟ (Schrader – Frechette, 1985).

إن حقائق RCBA أكثر إشكالية حتى من هذا، وأول الأسباب هو أن عملية اختيار التفاصيل التي تبدو موضوعية وتفضّل على غيرها التي تبدو غير موضوعية، هي ذاتها عملية تقييمية ويبدو أنها تتناقض والافتراض الأول لدراسة محايدة – القيمة. والسبب الثاني هو أن الحقائق الموضوعية التي عادة ما تدرج في RCBA تتضمن تقييمات تجارية ربما تكون قابلة للرؤية وواقعية، غير أنها في الوقت ذاته شديدة التغير وتخضع إلى الزي السائد والذوق والعديد من العوامل الأخرى غير الموضوعية.

حتى إن أسعار ضروريات الحياة الحديثة مثل مصادر الطاقة ـ وهي افتراضياً أقل تأثراً بالذوق ـ تعكس فعلياً القيمة فقط عند اللحظة التي تعطى فيها. خذ أسعار إحدى السلع مثل النفط، فقد ارتفع سعر البرميل منه على أسس تجارية من بضعة دولارات إلى أكثر من ثلاثين دولاراً في أقل من عقد ثم تراجع خلال سنتين فقط إلى أقل من تلك القيمة التي مثلت ذروة سعره. ولما كان القصد من RCBA هو تقييم المشاريع عند مرحلة التخطيط، وإذا ما كان سعر النفط سيدرج فيجب أن يعطى سعره عند تاريخ مستقبلي مخمن ـ أي عند زمن تكون الخطط فيه قد وضعت قيد العمل. وما هو التقييم الموضوعي لسعر النفط في المستقبل؟ من الواضح أنه ربما يعتمد على التوقيت الذي أجريت فيه الدراسة وعلى آراء وقيم الشخص الذي ينفذ الدراسة. وهناك في الحقيقة تقديرات احتمالية للقرار في ظل مستقبل غير واضح تدعى التقديرات البايسية (Bayesian Estimates) وهي تتفق على أنها موضوعية (Raiffa, 1970).

يبدو من الصعوبة خاصة إعطاء شرعية لإهمال العوامل غير السوقية لأنها محملة بالقيم أيضاً، فحتى أكثر الحقائق موضوعيةً قد تكون غير قابلة للفصل عن قيم محلل القرارات. ويبقى الأمر عرضة للتساؤل، حتى إذا كان بالإمكان فصل الحقائق عن القيم، إذا ما أهملت الكلف الإنسانية في حالة وجودها. إن فعل ذلك ربما يعطينا دراسة أكثر موضوعية في بعض الأوجه لكنها بعيدة عن التكامل. ويبدو هذا التقييم أكثر تحيزاً من ذاك الذي يخصص قيمة اعتباطية لحياة الإنسان. فالأخير يقر على الأقل بوجود كلفة إنسانية. ولتجنب مواجهة هذه الكلفة قد نشتري الموضوعية على حساب اللاعقلانية.

يريد بعض المنظرين ممن يريدون إلغاء المتغيرات غير السوقية من RCBA عمل ذلك، لا بهدف إهمالها، بل بالأحرى لتجنب إعطاء قيمة كمية لعوامل لا يمكن فعل ذلك معها. ويعتقد هؤلاء المنظرين أن إعطاء قيم لمتغيرات غير تابعة للسوق يغالي في القوة المعطاة لمحللي القرارات، طالما تبدو أرقام الكلفة – المنفعة لديهم عند ذلك شاملة لكل شيء (Mishan, 1972). وتبعاً لمثل هذه النظرية فإن RCBA يجب أن تركز على ما هو قابل للقياس ويجب على المحللين أن يلاحظوا ببساطة فقط تلك العوامل التي لا يمكن قياسها. عند ذلك يُترك الأمر لصنّاع السياسة (وليس لمحللي القرارت) ليقرروا أي من العوامل – التجارية أو غير التجارية – التي ستحتل المرتبة الأهم. وقد لا يكون مشروع ما مقبولاً لأسباب اجتماعية رغم أن تحليل RCBA أبدى جدواه من حيث الكلفة. وهذا الأسلوب يبقي على RCBA في موضعها كأداة لصناع السياسة بدل قيامها بتحديد السياسة.

غير أن حججاً بالرصانة نفسها يمكن أن تقدم للقيام بإعطاء قيمة كمية لكافة المتغيرات المهمة ومهما كانت صعوبة المهمة. وقد تبقى القضية معلقة على الإجابة لهذه السؤال: فإذا ما كانت الكلف والمنافع النوعية لا تعطى قيمة، فكيف سيمكن على وجه الدقة تقدير أهميتها في العملية السياسية مقابل كلف ومنافع قابلة للتقييم والقياس؟ بعبارة أخرى، رغم إمكاننا القول إن التلوث ضار بالصحة، إنما كيف يمكننا إعطاء وزن لهذه الإفادة لكي نقرر المبلغ المطلوب للتحكم بالتلوث، وهو ما قد يتراوح بين بضعة دولارات إلى مئات الملايين لمحطة توليد كهربائي واحدة.

لاحظت الفيلسوفة ك.س. شريدر – فريشيت أن إعطاء قيم للمتغيرات غير التابعة للسوق يقدم على الأقل أسساً للتداول والنقاش. وتلاحظ مثلاً أن دراسة راسموسن عن سلامة المحطات النووية عندما أعطت معالم رقمية دقيقة (انظر الفصل السابع) أتاحت توجيه تحد واضح. أما العموميات المبهمة فسيكون من الأصعب مواجهتها (Schrader – Frechette, 1985). بالنسبة إلى أولئك الذي يعتقدون بطريقة وضع قيم لكل شيء هي كيفية إنجاز ذلك. فمن الواضح أن إعطاء قيم اعتباطية لحياة الإنسان وبقية المتغيرات غير التجارية ليس بالحل الملائم. غير أن طرقاً مختلفة قد اقترحت وكما سنرى لتحسين طريقة RCBA للتقييم.

اتخاذ القرار في حكومة الولايات المتحدة

يعتمد صناع السياسة في الولايات المتحدة بصورة واسعة على طريقة CBA التي فُوِّض باستخدامها في كافة المشاريع التكنولوجية الاتحادية[3]. وقد واصلت الكثير من التحليلات بافتراض حيادية القيمة. هناك أمثلة عديدة لدراسات الكلفة – المنفعة التي فوضت بإجرائها الحكومة والتي تجنبت بصورة صارمة إعطاء قيم للعناصر غير التجارية. فقد أهملت دراسة RCBA عن سلامة ناقلات النفط البحرية من قبل دائرة الكونغرس لتقييم التكنولوجيا سنة 1975 كلفة التسربات النفطية. فقد حذفت على وجه الخصوص ذلك النوع من الكلف المتعلقة بالضرر الجمالي للشواطئ، وكلفة تجنب البواخر الأخرى للمياه الملوثة والضرر المتوقع لصناعة الصيد. كل هذه الكلف كان من الصعب وضع قيم لها لذا فقد تركت جانباً (الانتقاد في:,Schrader- Frechette 1985).

يجب أن نلاحظ أن محايدة القيمة كما يبدو تُناقض الروحية الأساسية لصناع السياسة الحكوميين. فالحكومة تبدأ في عملية وضع الأهداف السياسية ذاتها بمجموعة من القيم وليس الحقائق. ويجري تبني السياسات (جزئياً على الأقل) لأنها ذات فائدة وستحسن الرفاه المجتمعي بصورة عامة. ويستخدم صناع السياسة في

---

3 وقَّع الرئيس ريغان عام 1981 الأمر الرئاسي 12291 طالباً فعلياً من كل الوكالات الحكومية إعداد تحليلات كلفة – منفعة لكل قرارتهم التنظيمة الرئيسة. ولمناقشة المترتبات، انظر:

D. Whittington and W. N. Grubb, «Economic Analyses in Regulatory Decision: The Implications of Executive Order 12291», *Science, Technology and Human Values*: vol. 9/ no.1, 1984, pp. 63 -71.

خيارهم هذا اجتهادهم مدفوعين بأفكار عما هو صحيح وجيد وكيف يمكن لحكومة ويتصرف واقتصاد وبنية اجتماعية وأن تعمل. وغالباً ما تكون حيادية القيمة ببساطة أمراً مستحيلاً. ولم يكن لدى صناع السياسة الحكوميين أحياناً خيار غير مواجهة القضايا غير التابعة للسوق وبخاصة الكلفة الممكنة في أي تكنولوجيا بالنسبة إلى الإنسان. مع ذلك وفي مثل هذه الأوقات وبدلاً من اعطاء توجيهات دقيقة لوضع معايير للصحة والسلامة، فإنهم مالوا إلى وضع مفاهيم غامضة. فالمعايير التنظيمية في كافة تكنولوجيات توليد القدرة التي بحثنا فيها تتجنب الحسابات الدقيقة للكلفة النقدية والمنافع بالنسبة إلى حياة الإنسان ومعاناته. لقد أقر المسؤولون بأن المشاريع يجب أن يكون فيها مستوى مقبول من الخطورة أو أنهم استخدموا بصورة مساوية قاعدة مستوى عتبة لا توجد دونه افتراضياً خطورة[4].

المثال الواضح لكيفية عمل هذا الأسلوب لتناول الموضوع عملياً هي سياسة هيئة التنظيم النووي عن سلامة محطات توليد الكهرباء النووية. فبعد مراجعة لسلامة المحطات في أعقاب حادثة ثري مايل آيلاند (انظر الفصل السابع)، أصدرت الهيئة وثيقة بعنوان أهداف السلامة في محطات القدرة النووية (Safety Goals for Nuclear Power plants). هذه الأهداف مذكورة نوعياً وبمصطلحات كمية، إنما غير مثبتة كقيمة نقدية (وهي مذكورة هنا مع إعادة صياغة).

يجب أن لا يتحمل أفراد الجمهور أي خطورة إضافية مهمة تؤثر في حياتهم وصحتهم تتجاوز المستوى الأساسي الثابت بسبب اشتغال المحطات النووية.

إن الأخطار الناجمة عن توليد الكهرباء بواسطة المحطات النووية يجب أن لا تكون أكبر من تلك التي تسببها التكنولوجيا المنافسة القابلة للتطبيق (وهي تكنولوجية محطات الكهرباء العاملة بالفحم)[5].

---

4 لدى محاكم الولايات المتحدة قواعد تنص على أن الخطورة قد تكون قليلة بدرجة لا داعي معها لاعتبارها. انظر: Ricci and Molton, 1981.

5 انتُقدت هيئة التنظيم النووية عند تبنيها لهذه الأفكار من قبل هيئتها الاستشارية التي اتهمتها بالتخلي عن قواعد أشد صرامة. وكان من بين هذه قاعدة تقول إن الخطر يجب أن يكون بأوطأ مستوى معقول ممكن (ALARA) أو (As Low As Reasonably Achievable) وكانت مستندة إلى فكرة استخدام أفضل تكنولوجيا متوافرة.

إن عبارات مثل «خطورة إضافية مهمة» و«مستوى مقبول من الخطر» عبارات غامضة ولا يساعد استخدامها كجزء من تقرير تحليلي يرفع إلى صناع السياسة. إنما هل يوفِّر المعيار القابل للقياس في هذه الحالة – مقارنة الأخطار – مقياساً أفضل؟ يقتصر ذلك على وضوح احتمالية وقوع الحادث فقط. كانت هيئة التنظيم النووي قد وضعت معياراً لما يجب أن تكون عليه تلك الاحتمالية. فقد أوردت أن كل مفاعل نووي يجب أن يشيد بحيث إن فرصة حدوث انصهار للقلب فيه لا تتجاوز مرة كل عشرة آلاف[6]. تنبع هذه الصياغة من تقرير راسموسن الذي قام بتقدير احتمالية الانصهار واحتمالية وقوع أسوأ حادثة ممكنة. وقد بينت النتائج كما روي في الفصل السابع أن مثل هذه الاحتمالية كانت نادرة جداً، وكان القصد منها إظهار إمكانية إهمال الأخطار[7] في الحياة اليومية من قبل المواطن العادي. وكان هناك كما لاحظنا على أي حال تساؤل حول دقّة تقديرات راسموسن للاحتمالية ولم يبدُ أن هذا المعيار كان مطمئناً للجماهير بصورة عامة. إضافة إلى ذلك ورغم محاولات وضع قيم لم تكن هناك وسائل مقبولة بصورة عامة للتأكد من أن تصميم مفاعل يحقق فعلاً أهداف السلامة. وهكذا يبقى المعيار الاحتمالي لهيئة التنظيم النووي عرضة لاختلافات كثيرة.

الطرق البديلة للقيام بدراسة RCBA

رغم أن المنظمين الحكوميين قد اتجهوا نحو استخدام معايير غامضة أو غير قابلة للاختبار في ما يخص مستويات الخطر للجماهير فلا يعني ذلك استحالة تطوير معايير أقوى وأوضح وأن RCBA لا يمكن أن تلعب دوراً في هذا التطوير. وهناك ثلاث طرق مهمة بديلة.

التفضيل المكشوف

تدعى أحد الطرق التي كان لها عدد من الدعاة خاصة في المجتمع التقني، طريقة التفضيل المكشوف. وتقول هذه الطريقة إن هناك مستوى من الخطر المقبول،

6 هذا يشير إلى الفرص لكل مفاعل سنة من العمل (انظر الفصل السابع).

7 تمتلك هذه الفكرة تاريخاً فكرياً مشوقاً. فقد تكهن أحد علماء الرياضيات المدعو إدوارد إميل بوريل (1871 – 1956) عند بداية القرن العشرين بوجود مستويات احتمالية قليلة بدرجة بحيث لا يتوقع الإنسان بأنه سيلحظ ذلك الحدث في حياته.

وتعرض أسلوباً إحصائياً حول كيفية تحديد ذلك. أساس الفكرة هو أننا نتحمل بعض المخاطر المحددة في حياتنا اليومية. فنحن نسوق السيارات ونمشي في الشوارع ونستخدم الأجهزة الكهربائية ونستقل المصاعد الكهربائية ونتعاطى الأدوية وما إلى ذلك، وكل هذه الفعاليات يمكن أن تسبب الإصابات أو الموت وقد فعلت ذلك. وإذا كان بالإمكان بيان وجود نوعٍ من التكنولوجيا أقل خطورة من معظم ما ذكر أعلاه بطرق إحصائية، وإذا ما امتلكَ ذلك النوع منافع جوهرية أيضاً، فيجب أن لا يكون لدينا تردد حول تبنيه. وقد استخدمت هذه الحجة من قبل الدكتور راسموسن كما استخدمت من قبل الفيزيائي الحاصل على جائزة نوبل هانز بيته (Hans Bethe) لدعم تطوير الطاقة النووية في الولايات المتحدة[8]. ومهما يبدو من معقولية مثل هذا الموقف إلا أنه في الحقيقة يحوي عدة عناصر إشكالية عندما يطبق على القدرة النووية. هناك أولاً خطورة المحطات ـ والنفايات التي تنتجها ـ فهل هي معروفة بصورة كاملة؟ الشيء الثاني هو هل أن تقديرات الحاجة للمحطات النووية (أو أي نوع آخر من المحطات) صحيحة بالضرورة؟ والشيء الثالث هو هل أن الخطورة عندما نرغب بقيادة سيارة هي من نفس النوع الناجم عن بناء محطة نووية قريبة من بيوتنا؟

وقد قمنا في أجزاء من هذا الكتاب بدراسة المسألتين الأوليتين من هذه الوسائل. أما الثالثة فيمكن على أي حال مناقشتها هنا. تكمن القضية الحيوية في طبيعة المخاطر التي تجري مقارنتها في تحليل التفضيل ـ المكشوف. فهما مختلفتان نوعياً ـ وبعضها اختياري في حين أن الآخر غير اختياري. وقد نكون في الحقيقة مستعدين أن نأخذ على عاتقنا خطورة من نوع ما لكي نقود سيارة، مدركين أنها تفيدنا بصورة مباشرة كوسيلة نقل في متناول أيدينا. غير أن القرار بخصوص بناء محطة قدرة هو في الأغلب قرار يعود إلى الحكومة و/أو إلى شركة كبيرة وأن أولئك المعرضين للخطر مباشرة قد لا يملكون إلا تأثيرا ضئيلاً على القرار أو لا تأثير بتاتاً. وبعبارة أخرى فإن قيادة السيارة مخاطرة طوعية في حين أن بناء محطة القدرة مجازفة لا طوعية بتميز. ومن الممكن تقديم الحجج على وجود عنصر محدد لا طوعي في قيادة السيارة، ولكي نؤدي عملاً في مجتمعنا المتبني للسيارة علينا قيادتها. ومن المنطلق نفسه فإن العيش بجوار محطة

---

8 ومن الدعاة الآخرين تشاونسي ستار (Chauncy Starr) من معهد بحوث القدرة الكهربائية وبرنارد كوهين (Bernard I. Cohen). وقد طور كوهين وإ. لي (I. Lee) جدولاً مفصلاً لاحتماليات الخطورة لاستخدام محللي القرار. انظر:
Cohen and Lee. «A Catalog of Risks,» *Health Physics:* vol. 36, June 1979, pp. 708 – 721.

قدرة عمل اختياري. والذي يعيش قرب موقع سيجري بناء محطة نووية فيه يستطيع الانتقال. والحالتان على أي حال غير متكافئتين. فالأولى هي خيار حياتيّ يمكن تخطيطه بسهولة خلال مرحلة بلوغ الإنسان وتتيح عدداً كبيراً من الخيارات. أما الثانية فهي خيار إما/ أو غير مرئي ومفروض عند زمن محدد من غير خطوات وسطية متيسرة. لذا فإن الخطرين مختلفان نوعياً. فقبول أحدهما طوعاً لا يمثل سبباً كافياً يسمح لفرض الثاني عليك. إن الجدل القائل إن الفرد يجب أن يتقبل أحد الأخطار لأنه قبل نوعاً آخر هو مثال للمغالطة الواقعية في الأخلاقيات[9]. فالإحصاءات حول الأخطار النسبية حتى إذا ما كانت تقييماً صحيحاً تماماً ذا أهمية أقل بكثير بالنسبة إلى الجدل هذا.

الحقيقة أن بعض دعاة طريقة الخيار المكشوف يقرون بوجود المشكلة وقد حاولوا إدخال عامل تعويض في حساباتهم. فالمخاطر غير الطوعية مثلاً قد تعطى قيمة أعلى لذا فهي بحاجة إلى قدر أكبر من المنفعة للتعويض عن تلك المخاطر (Starr, 1976). وقد نجم عن المحاولات لإيجاد مستوى مناسب من التعويضات نتائج واسعة التباين على أي حال.

غير إن مثل هذه الحسابات تميل إلى التغطية على قضايا أكبر لا علاقة لها بالتفكير بل بالمساواة في مجتمع ديمقراطي. والأهم من ذلك عندما تتخذ السلطات الحكومية قرارها في النهاية حول إنشاء محطة نووية أن القرار يتطلب من بعض الأفراد تحمل مخاطر خاصة. ورغم أن قرار الحكومة في هذا الخصوص هو افتراضي لمنفعة عدد كبير من الجماهير، إلا أن الخطر الناجم عن القرار لا يقتصر على كونه غير طوعي، بل إنه غير متكافئ. لذا يصبح البعض عندما يجري إنشاء محطة قدرة، أكثر عرضة للخطر من الغير بحكم قربهم من المحطة وحسب، إن لم يكن لأسباب أخرى. قد تكون الحقيقة إن البعض يفرضون أخطاراً ليسوا هم بذاتهم مستعدين لتحملها – وهو افتراض لا يبدو متلائماً مع مفهومنا للمساواة والعدالة.

9 يمكن للمغالطة الواقعية أن تكون واحداً من ثلاثة أخطاء: (1) المزج بين التعابير الأخلاقية والحقيقة، (2) اشتقاق البيانات الأخلاقية من بيانات لا علاقة لها بالأخلاقيات – أو الخلط بين (يكون) و (يجب) و (3) تعريف المفاهيم الأخلاقية بمصطلحات لا علاقة لها بالأخلاقيات. وللبحث عن المغالطة الواقعية بالنسبة إلى القدرة النووية (انظر الفصل السادس من Schrader- Frechette, 1983).

التفضيل المعبّر عنه

كان أحد الحلول الإبداعية للمأزق الأخلاقي والتقييمي لمنهجية RCBA قد اقتُرِح من قبل إي. جاي. ميشان وهو اقتصادي مختص في نظرية RCBA. يقترح ميشان تحويلاً في RCBA، يلغي بعضاً من مشاكلها الأخلاقية المتعلقة برأس المال الإنساني وطرق الخيارات المكشوفة. يأخذ هذا أسلوب تقييم الكلفة – المنفعة مبدئياً بعيداً عن المحلل الخبير (مهندس أو اقتصادي) ويضعه مع الجماهير المعرضة للخطر (Mishan, 1976, 1981).

وينجز تحول ميشان من خلال:

التحرك من محاولة حساب قيمة الحياة في مجتمع متأثر بتغير في مستوى الخطر إلى حساب تقييم المجتمع الذاتي لذلك التغير في الخطورة.

أخذ التقييم الذي يضعه كل فرد من الجمهور المعرض للخطر على التحسين (أو التردي) في مستوى الخطر المعرض إليه الفرد بنظر الاعتبار.

ونستطيع مباشرة رؤية معنى التحول. فالتوكيد أولاً كما في الخيار المكشوف هو على الخطر وليس على الحياة فتقييم كلفة تقليل نوع من الخطر أسهل أخلاقياً من وضع قيمة للحياة. إنما تحسّن هذه الطريقة على طريقة الخيارات المكشوفة بالرجوع إلى أولئك المتأثرين ذاتهم. وهي تقوم باحتساب ما يعنيه التغيير في المجازفة مستخدمة القاعدة الضمنية القائلة إن كل فرد هو أفضل من يعرف مصالحه. وتقوم الطريقة أيضاً بجمع معلومات عن خيارات أولئك المتأثرين بالنسبة إلى ذلك النوع من المخاطر[10].

ويجري في طريقة ميشان استفتاء عيّنة تمثل أولئك المعرضين للخطر عن مقدار ما يعنيه الخطر نسبة إليهم وكم هم مستعدون أن يدفعوا ليتجنبوا أو ليقللوا من أثره. وبعبارة أخرى إذا كان مشروع ما يعني الموت شبه المؤكد أو الإصابة لبعض أعضاء

10 إن خصوصية نوع الخطر تشير إلى مشكلة أخرى في طريقة الخيار ـ المكشوف. فالافتراض في جهود التعويض عن المخاطر غير الطوعية، هي أن الجمهور ينظر إلى واحدة من المخاطر غير الطوعية بنفس الطريقة التي ينظر بها إلى أخرى. ومع ذلك فلا من سبب يجعلنا نعقتد أن هذه هي الحالة. وتتجنب طريقة الخيار المعبر عنه في هذه المشكلة بالتركيز على أخطار محددة.

المجتمع فالمتوقع أنهم لن يكونوا مستعدين للقبول به عند أي كلفة أو أنهم مستعدون لدفع مبالغ كبيرة لتقليل مستوى الخطر. ومن ناحية أخرى إذا ما اقتنعوا بأن المخاطر تافهة فقد لا يكونون مستعدين لدفع أي مبلغ. إلا أن أهمية الحقائق الإحصائية لن تتجاوز أهمية الأخطار أو القدرة على فهم معانيها بما في ذلك ما يترتب على الحوادث ذات العلاقة. فبعض المشاريع، ولنقل مشاريع القدرة النووية قد تبدو تقريباً غير ذات خطر بالنسبة إلى خبير ينظر فقط في احتماليات وقوع حادث إنما سيبدو مشروع من هذا النوع أمراً شاقاً بالنسبة إلى أولئك المعرضين للخطر الناجم عنه. إن ذلك التصور الذي ربما يقلب الشعور بالرفاهية (وهو ما يصعب تقديره كمياً من قبل شخص خارجي) سيكون على درجة أكبر من الأهمية للناس ذوي العلاقة لذا سيكون له وزن أكبر مقارناً بالتقديرات الأكثر موضوعية لفرص حدوث الخطر وحسب. ولا يوجد مثال أفضل لهذه المترتبات الملموسة من القدرة النووية. فالشعور بالخوف من الإشعاع عميق كما دون ليفتونووير ذلك (انظر مراجع الفصل السابع).

رغم أن هذه الطريقة التي تدعى «الخيار المعبّر عنه» في طريقة RCBA توفّر معلومات عن تصور وشعور الجماهير، إلا أنها مصممة فقط لإحداث وسائل أفضل للتقييم الكمي للخطر وليس المقصود منها استفتاء للرأي العام عن مشروع تكنولوجي. ومع ذلك تبدو أكثر ديمقراطيةً من أي من طريقتي رأس المال البشري أو التفضيل المكشوف، بسبب قيامها بالتركيز على خيارات الجمهور بدل الخبراء. ويرى فيها بعض مسانديها جزءاً من حركة عامة لتوظيف التصور العام في القرارات حول الطاقة والقضايا التكنولوجية الأخرى.

رغم إن هذه الطريقة تبدو كتحسين على طرق RCBA الأخرى، إلا أنها مع ذلك تثير مسائل تتعلق بتقنيتها وبالفلسفة الكامنة فيها. فطريقة صياغة الأسئلة مثلاً يمكن أن تؤثر في نتائج المسح. وأيضاً لما كان الناس المعرضون للخطر يفتقدون الخبرة التقنية بصورة عامة، فهناك قلق حول قيام الباحثين بتبسيط المشاكل أكثر مما يجب، بحيث لا تبقى تعكس حقيقة المشكلة. هناك عائق آخر في الطريقة أيضاً، وذلك عندما ننظر في مشاريع الطاقة المعمّرة (أو أن تأثيرها معمّر) عبر عدة أجيال. سيكون لدينا في مثل هذه الحالات بعض الناس ممن يعطون حكمهم عن تقبل المخاطر اليوم نيابة عن أناس في المستقبل، ممن قد تكون أنظمة قيمهم واعتقاداتهم مختلفة والذين سيتعذر التوقّع

بخياراتهم حول الخطر. (Grossman and Cassedy, 1985). والحقيقة أن جيلاً يعمل لصالحه الذاتي قد يصيب بالضرر العالم بطريقة لا رجوع فيها بالنسبة إلى الأجيال القادمة.

طريقة RCBA المتوازنة أخلاقياً

إن الأسلوب البديل للتغلب على مشاكل RCBA هو في تبني طريقة وزن أخلاقية في احتساب الكلف والمنافع. وعلى محللي القرارات هنا استخدام القيم الأخلاقية كمعيار مهيمن في حساب RCBA. وبعبارة أخرى فإن أي اقتراح تكنولوجي يؤدي إلى انتهاك القيم الأخلاقية الأساسية يتطلب مراجعة شاملة أو يرفض بصورة تامة – بغض النظر عن تأثيراته التابعة للسوق على الكلفة.

وسيتطلب أحد هذه المفاهيم تبني منظوراً واحداً للعدالة التوزيعية لتوفير الإطار للتحليل (Kneese, Ben David and Schulze in: MacLean and Brown, 1983). فالمرء مثلاً يستطيع استخدام المفهوم النفعي لأعظم قدر من الفائدة لأكبر عدد من الناس أو فكرة مساواة مبسطة تقول بأن الأفعال يجب أن تحسن نصيب الشريحة الأسوأ حالة[11]. وعلى محللي القرارات ضمن هذه القيود أن يقرروا استخدام المضمون الثاني أي المجموعة الأسوأ حالاً ليروا إذا ما كانت ستستفيد من المشروع قيد الدراسة. وإذا كان حال تلك المجموعة سيسوء إلى درجة أكبر، فيجب إلغاء المشروع حتى إذا كان هناك تحسن عام في رفاه المجتمع.

وربما نكون قادرين بصورة أفضل من خلال مثل هذا النظام للوزن الأخلاقي على التعبير عن أحكامنا حول القضايا ما بين الأجيال. فيمكننا القول مثلاً باستخدام الصياغة النفعية أن علينا أن نشمل كل أولئك الذين قد يتأثرون في المستقبل. وإذا كان متوقعاً تعرضهم لخطر كبير أو تحميلهم كلفاً كبيرة في حين نجني نحن في هذا الجيل المنافع فسيكون المشروع غير مقبول. وباستخدام أي قاعدة محددة قد تترك بالطبع

---

11 إن الصياغة التي استخدمها نيز (Kneese) وزملاؤه للمنظور المساواتي هي أن علينا أن نحاول «تعظيم منفعة الفرد الأقل انتفاعاً... حتى يلحق بالفرد الذي يسبقه انتفاعاً بدرجة». بمعنى أن تصبح «كل المنافع متماثلة» وهذه مأخوذة من نظريات جون راولز (1971). وكان على نيز وزملائه إزاء أفكار راولز أن يتدعوا منظوراً بسيط التعبير للعدالة المساواتية وهو ما لم يكن بالإمكان تجنبه.

في وضع غير واضح المشروعية الأخلاقية لواحد من طرق العمل المتبعة أو لآخر. ويمكن في تلك الحالة تحديد السياسة تبعاً للعوامل العادية لحسابات الكلفة – المنفعة. ومع ذلك ستكون المشكلة على الأقل قد خضعت للتدقيق من منظور أخلاقي ويمكن عند ذلك تبرئتها من انتهاك المعايير الأخلاقية.

وهناك بالطبع مشكلة بدهية في هذا الأسلوب. فهو حري باختزال كافة الأخلاقيات إلى مقولة واحدة بسيطة التعبير. ففي مجتمع تعددي مثل مجتمعنا لا يتوقع وجود معيار واحد لعدالة التوزيع يثني عليه الجميع. وتكمن إحدى الطرق لتجاوز تلك المشكلة في تحديد مبدأين أو ثلاثة مبادئ أو حتى دزينة منها مما يعتقد بها ومن ثم القيام جوهرياً بأداء عدة تحليلات RCAB مختلفة. إلا أن هذا قد يؤدي إلى إرباك صناع السياسة. وقد بين أي. في. نيز وزملاءه أن عدداً لا يتجاوز أربع قواعد مختلفة للعدالة التوزيعية يمكن أن تؤدي إلى أربعة استنتاجات مختلفة – وقد تكون متعاكسة تماماً في بعض الحالات.

ورغم ذلك فقد يكون من المفيد لصناع السياسة امتلاك عدة مواقع مختلفة ليفكروا[12]. وإحدى المشاكل مع RCBA تقليدي هي أنه من خلال توفيره مجموعة واحدة من الأرقام، يميل إلى عدم السماح بوجود غموض. وربما تشير عدة أنواع من التحليلات الموزونة أخلاقياً خلاف ذلك إلى التباسات وتحفز بذلك نقاشاً أوسع شمولية للمترتبات الاجتماعية والأخلاقية لنوع محدد من التكنولوجيا الذي ربما كان سيحصل اختياره لولا ذلك. ويجري بهذه الطريقة أيضاً وضع قيم للمتباينات الرئيسة من غير أن تكون أي مجموعة رقمية ذات صفة قطعية. ولا يمكن عند ذلك تحديد السياسة فقط على أسس دراسة RCBA مفردة. ويقوم محللو القرارات بتوفير مجموعة من البدائل فقط كي يستطيع صناع السياسة الاختيار من بينها. والذي ترك بغير كم هي عدد دراسات RCBA التي تعتبر كافية لتمثيل المدى القيمي في المجتمع بصورة وافية. ولا توجد هناك إجابة بسيطة لهذه المشكلة.

12 اقترحت شرادر ـ فريشيت (1985) نظاماً مختلفاً من RCBA الموزون أخلاقياً مبنياً على فكرة الادعاءات الأخلاقية المرتبة بطريقة المعاجم. ورغم أن نظامها معقد أكثر من أن نعطي تفاصيله هنا إلا أن من المناسب القول إنه يحتاج خطة وزن للادعاءات ربما تؤدي أيضاً إلى عدد من خيارات RCBA. لقد دافعت فريشيت عن فكرة تعدد خيارات RCBA مُلاحِظَة أن هذا سيعني أن «باستطاعة المواطنين اختيار القيم التي سيحددون من خلالها السياسة الاجتماعية مثلما يحددون السياسة ذاتها».

قد يمكن تحسين RCBA في الواقع، لكن ما يبدو واضحاً هو أن ما من طريقة واحدة يمكن أن تعطي إجابات حاسمة حول أفضل الطرق لتحديد معايير الصحة والسلامة. وإذا لم يكن بإمكان RCBA توفير إجابات حاسمة فعلينا أن نفكر بمن يستطيع تحديد ذلك. فمن الذي يجب أن يحدد شكلRCBA والطريقة التي يجب أن تصاغ بها معايير السلامة؟ والحقيقة هي أن المعايير لمّا كانت لا تقبل الانفصام عن التكنولوجيا الأساسية أصبح من الواجب توسيع السؤال: من الذي يقرر السياسة المتحكمة بالتكنولوجيا؟

من الذي يجب أن يقرر؟

حاول البعض أن يبرهن أن المهندسين والعلماء فقط لديهم الخبرة على فهم التكنولوجيا الجديدة لذا فهم الوحيدون المؤهلون لاتخاذ القرارات حيالها. غير أن هذا الموقف يفترض بالضرورة ما هو موضع نقاش واسع، فهو إما أن يفترض أن القضايا هي تكنولوجية بحتة أو أن الخبراء التقنيين يمتلكون أوسع بصيرة في كل مترتبات التكنولوجيا أو كلاهما. وقد كان هذا بالطبع موضع اختلاف منذ سنين عديدة (Laski, 1931). وليس من المتوقع أن تكون هذه الافتراضات هي الحالة عندما يجري النظر في صحة الناس وثروتهم ومنظومتهم القيمية. والحقيقة أن الخبراء وكما رأينا، غالباً ما تبنوا افتراضات مشكوك فيها في تحليلاتهم للقضايا التكنولوجية.

والسبب الآخر في عدم كون الخبراء حكاماً مثاليين بالنسبة إلى السياسة العامة هو أنهم غالباً ما يختلفون في ما بينهم ويترك المجتمع في مأزق حائراً في من يصدق من الخبراء. فالمواطن العادي لا يستطيع وضع ثقته في أي خبير ببساطة لكونه كما يبدو يستخدم الحقائق في الجدال. وغالباً ما يبقى الجمهور والمسؤولون الحكوميون نتيجة ذلك مرتبكين ومترددين حيال النقاشات حول القضايا الفنية. وهذا ما يمكن مشاهدته مثلاً في النقاش الدائر حول معايير الحكومة الاتحادية المتعلقة بنوعية الهواء.

فقد وضع قانون الهواء النظيف لسنة 1970 (وتعديلاته سنة 1977) أسس معايير أولية لنوعية الهواء الذي يحيط بنا كما رأينا في الجدول 6-3 وهي مرتبطة بصورة وثيقة بأفضل التقديرات بموجب الاجتهادات حول عتبات التأثير. وبعبارة أخرى أن المعايير التي جرى تبنيها كانت متعلقة بتقدير لنقطة لا يوجد دونها، افتراضياً، أي

خطر يمكن قياسه (Cassedy 1992-3) وكانت المعايير بحسب ما يبدو تستند إلى معتقدات المجتمع العلمي.

ورغم افتراض إجماع الآراء العلمية جرى تحدي مفهوم العتبة في ما يتعلق بتلوث الهواء بسرعة. وقد جرى أولاً البرهان على أن مجموعات معينة من السكان لديها مستوى عتبات، تتعلق بالمشاكل الصحية نتيجة تلوث الهواء، أدنى من بقية السكان. ومن المعلوم أن الأطفال وكبار السن عرضة للتأثر بصورة خاصة. غير أن الاختبارات المختبرية أيضاً بدأت تبين تأثيرات فسيولوجية لدى الجمهور عامة في تراكيز ملوثات أدنى بكثير من العتبات المحددة. وقد قادت هذه الأمثلة بعض الخبراء إلى الاستنتاجات الآتية:

(أ) ربما لا يوجد معيار لعتبة واحدة لنوعية الهواء يلائم مجموع السكان.

(ب) إن المواصفات الحالية متهاونة جداً.

(ج) إن الطرق التي تتبعها الكيانات التنظيمية لوضع المواصفات والمعايير غير ملائمة (انظر في مراجع الفصل السادس من: (Wilson [et al.], 1980).

غير أن النقاش مع ذلك لم يغير وجهات نظر كل الخبراء، ولم يكن له إلا أثر قليل في المنظمين الاتحاديين، لذا تركوا المواصفات على حالها.

وقد ساد اختلاف الرأي والشك بطريقة مشابهة حول عتبات التعرض للمجالات المغنطيسية والكهربائية. فالمجالات شديدة القوة مثل تلك الواقعة تحت خطوط الفولتية العالية (آلاف الفولتات) لنقل القدرة، لها تأثيرات بيولوجية ملموسة. إلا أن شدة هذه المجالات على أي حال تتناقص بسرعة كلما ابتعدت عن الخط. لذا فإن العلاقة السببية والتأثيرات للمجالات الأقل شدة (التي تنشأ عن خطوط ذات قدرة أقل أو على مسافات بعيدة عن خطوط الفولتية العالية) التي قد تسبب الضرر وتؤثر في الحيويات، أمر يصعب إثباته.

ومع ذلك فإن الدراسات الوبائية قد أشارت إلى مخاطر سببها مجالات أضعف بكثير مما كان يعتقده المهندسون ذات أثر. والمجالات المغنطيسية المتذبذبة عند 60 هرتز أي الذبذبة المستخدمة في التيار المتردد المنزلي (انظر الفصل الثالث) قد أشير

إليها في عدد من الدراسات التي أظهرت ارتفاعاً كبيراً في حالات لوكيميا الأطفال. ويشك أن ما يعزز انتشار الداء هو الإخلال بتفاعلات بيوكيميائية في الجسم تعتمد هي ذاتها على مجالات صغيرة لتعمل. وقد جرى حتى الآن البرهان على وجود الضرر بصورة إحصائية فقط غير أن متضمنات السبب والتأثير لم تقبل بصورة عامة. ورغم أن بعض الخبراء يرغبون بوضع مواصفات معيارية لمستويات التعرض إلى المجالات المغنطيسية والكهربائية ذات القوة المنخفضة إلا أن أي منها لم يُضَع وهناك العديد من الخبراء لا يرون حاجة إليها.

ولا يقتصر الأمر على اختلاف الخبراء إذ إنهم لا يرون حتى في بعض الأحيان المشاكل بالطريقة نفسها. فقد طُلب من المهندسين والجيولوجيين، مثلاً، وضع تقدير لخطورة وقوع زلازل أرضية في موقع مفاعل نووي في كاليفورنيا. ورغم أننا ننظر بصورة عامة إلى المهندسين والجيولوجيين على أنهم أعضاء في المجموعة العلمية إلا أنهم أعطوا نتائج مختلفة تماماً.

فقد أفاد الجيولوجيون أنه من غير الممكن وضع قيمة للخطر. أما المهندسون فقالوا إن مستوى الخطر منخفض إلى درجة لا تستدعي إدراجه في قواعد التصميم (Hund, 1986) ولا يكمن الخلاف في الحقائق، بل في الطريقة التي رأت فيها كل مجموعة العالم. فالجيولوجيون حاولوا فهم طبيعة الموقع قبل تشييد منشأة نووية. وحين تمكنوا من تشخيص بنية خاطئة، لم يستطيعوا تحديد ما إذا كان ذلك سيولد هزة أرضية قوية أثناء حياة المنشأة النووية. وقد قام المهندسون من ناحية أخرى باستخدام منهجية تقييم المخاطر التقليدية. ولم يتمكنوا أيضاً من التوقع بحدوث هزة أرضية أو عدمه غير أن الطريقة أتاحت لهم وضع أرجحية متدنية جداً (Hund, 1986).

وقد عرضت فكرة مهمة لوضع حلول للخلافات بين العلماء أو بين مجموعات من الناس ضمن المجتمع التكنولوجي. والفكرة هي محكمة العلم. وهذا المفهوم وخاصة الطريقة التي قدمها آرثر كانتروفيز (Arthur Kantrowitz, 1975)، وانظر أيضاً (Michalos, 1980)، تستدعي إنشاء نظام للدعاوى المتعاكسة تخص القضايا التكنولوجية الرئيسة. وسيحصل الخصوم في هذه المحكمة على فرصة لتقديم الأدلة واستجواب أحدهما الآخر ويقدموا حججهم كما في محاكم قانونية. وتعطي

مجموعة من العلماء يقومون بعمل هيئة محلفين القرار النهائي. ولن يكون هؤلاء كأفراد يعملون مباشرة في اختصاصات ذات ارتباط مباشر بالقضية موضوع البحث، لذا لن يقوم مهندسون نوويون أو فيزيائيون مثلاً بإعطاء القرار حول المنشآت النووية لأنهم قد يحصلون على فائدة من النتيجة. ولم يكن قصد كانتروفيتز لهذا الكيان أن يحدد السياسة ذاتها. فالمحكمة ستحدد ما يمكن عمله كقضية تقنية بحتة وليس ما يجب عمله في النهاية فذلك القرار سيترك لصناع السياسة. غير أن المحكمة على الأقل ستهدئ النزاعات التقنية وتسمح لعملية التخطيط أن تنطلق من هناك.

ومع ذلك فبراعة هذه الصياغة تحبط عدداً من المشاكل الكامنة. فالمفهوم يتضمن أولاً ثنائية الحقيقة ـ القيمة والذي كما رأينا قد يكون صعب المنال. الشيء الثاني هو خطورة الأخذ بقرار المحكمة كحقيقة، في حين أنه في أحسن الأحوال رأي حول الجهة التي قدمت أفضل الأدلة المقنعة أثناء المرافعة. وقد آثار الفلاسفة مثل شرادر ـ فريشيت قضية كون العلماء في أحد الاختصاصات خير القضاة للنظر في ادعاءات آخرين في اختصاص ثانٍ. ويمكن التساؤل مثلاً إذا ما كان العلماء يميلون للنظر إلى تقدم التكنولوجيا كشيء جيد في حد ذاته مما يجعلهم متحيزين لتفضيل مشروع ما، وميلهم لطلب أن يكون العبء الأكبر في البرهان على معارضي أي مشروع محدد.

وقد قدمت (شرادر – فريشيت 1985) حججاً بديلة لإنشاء محكمة تكنولوجية (Technology Tribunal). تحافظ على فرصة جلسة علنية لسماع الآراء المتضاربة، غير أن المحكمة كانت ستعطي حكماً أقل جزماً من حكم محكمة. وفي هذا المفهوم سيشمل المحلفون أشخاص غير علماء يمكنهم رؤية المسألة في إطار أوسع. وسيساعد هذا بدوره على تجنب انحياز الخبير الذي قد يميل، كما لاحظ هارولد لاسكي (1931) قبل أكثر من نصف قرن، إلى المزج بين الحقائق وبين «ما ينوي فعله حولها». وهذه الفكرة بالطبع موضع تحدٍ من قبل الذين يعتقدون أن غير العلماء لا يستطيعون فهم تعقيدات المفاهيم العلمية. إن القول بأن التكنولوجيا لغز لا يفهمه إلا النخبة من الناس، وأن فهم مشروع تكنولوجي بصورة جيدة يحتاج إلى سنين من الدراسة العلمية وإلى دراسة الرياضيات، أمر مرفوض ولأسباب وجيهة.

وترتبط قضية محكمة العلم والآراء حول مكوناتها كلها بالسؤال الأكبر وهو: من

يجب أن يصنع السياسة؟ وربما يعتمد الرأي الذي نتبناه على ما نرى أنه الدور المناسب للمسؤولين الحكوميين والخبراء والجماهير. وسينسب العديدون إلى الحكومة الحق في وضع تشريعات تخدم الصالح العام حتى عندما يتضارب ذلك مع رغبات بعض المواطنين. وهناك قوانين مثلا في الولايات المتحدة تمنع استخدام الأحداث أو الاستخدام الحر للمخدرات. وقوانين أخرى تنظم استخدام المواد السامة، وكل هذه القوانين لها بعض المعارضين لكنها بوجه عام مقبولة. ورغم أن بعض القيود الحكومية تصدر بصفة قوانين إلا أن البعض الآخر تفرضه الوكالات التنظيمية، فإدارة الغذاء والدواء مثلاً تسمح بوصول عامة الناس إلى الأدوية أو تمنعهم عنها. وتحدد هذه الإدارة ما هو صالح للمواطن. وتعتبر الحكومة في مثل هذه القضايا أفضل من يعرف ويعتبر تصرفها أبوياً لحماية مواطنيها. وتؤدي آراء الخبراء دوراً حيوياً كجزء من هذا المنظور الأبوي في عملية اتخاذ قرار.

ونستطيع بموجب هذه الخطة تصور كيفية قيام الحكومة بصياغة القرارات في ما يخص سياسة الطاقة. فسيوفر الخبراء المعلومات والتحليلات (بما فيها تحليلات RCBA)، ومن ثم سيقوم المسؤولون الحكوميون بإصدار تشريعات ملزمة حول استخدام وتطوير تكنولوجيا الطاقة، وحول معايير الصحة والسلامة – لمنفعة المجتمع بصورة عامة افتراضياً.

والقلة في مجتمعنا بالطبع من سينسب إلى الحكومة السلطة المطلقة وسيتوقع الكثيرون أن تحاول الحكومة معرفة آراء الجمهور وتزنها في أي تحليل. غير أن الفرع التنفيذي (أو التشريعي) من الحكومة يمكنه من خلال إطار أبوي ترسيخ السلطات للتصرف حيث يعتقدون أن الحاجة تدعو إلى ذلك. ولن يكون على هذه السلطات أن تستشير الجماهير أو ممثليهم قبل القيام بأي تصرف (رغم أنهم قد يخضعون للمحاسبة إثر قيامهم بالتصرف). وسيمتلكون جوهرياً حرية صنع وتوطيد المعايير وتنفيذ السياسات.

أما الآخرون فيرون أن الأبوية ليست إلا سلطوية ويطرحون حججهم على غرار ما قاله جون ستيوارت ميل. ولن يكون للحكومة في هذا المنظور أي حق عملياً في فرض سياسات على المواطنين مخالفة لرغباتهم. وكان ميل قد كتب:

«إن الغرض الوحيد الذي يمكن لأجله ممارسة القوة على أي عضو في مجتمع متمدن ضد رغبته هي منعه من إيذاء الآخرين. ولا يمكن إجباره بطريقة محقة على أداء شيء ما أو تحمله مسبقاً لأن من الأفضل له فعل ذلك، أو لأن ذلك سيجعله أسعد، أو لأن عمل ذلك يمثل الشيء الحكيم وحتى الصحيح بناء على رأي الآخرين».

وهكذا فإن حقيقة أن سياسة الطاقة ستفيد معظم الناس في المجتمع – ما لم نبين أنها تمثل قضية حياة أو موت – لا تشكل في هذا المنظور سبباً كافياً لفرضها على الآخرين وبخاصة إذا ما عرّضت أي فرد للخطر. ويجب على كل الذين سيتأثرون بها الموافقة على السياسة قبل إمكانية تبنيها.

ورغم أن السماح للأفراد بتقييد التطور التكنولوجي للمجتمع برمته قد يبدو إفراطاً لبعض الناس إلا أن العديد سوف يستمرون مطالبين بدمقرطة أوسع للقضية. وسيجادلون ضد أي فرض للسياسات من قبل الحكومة، وبخاصة عندما يكون هناك خطر على الحياة والصحة. وسيجري بحسب هذا المنظور الوصول إلى السياسات من خلال الوسائل الديمقراطية بما فيها الاستفتاءات المحلية أو حتى الوطنية. ويجب في هذه الحالة تزويد المصوتين ربما من خلال التلفزيون أو الراديو بكل المعلومات ذات العلاقة بما في ذلك المعلومات التكنولوجية. غير أن فكرة الاستفتاءات للبت في التطورات التكنولوجية، رغم كونها ديمقراطية تتطلب جمهوراً واعياً. وتعرض هذه الطريقة في الحقيقة احتمالية تحديد الإجابة عن مسألة ما بواسطة حملات إعلانية بدلاً من اعتماد الوقائع الموضوعية.

وقد تؤثر الأساليب الديمقراطية، إذا ما لجأنا إليها في الكفاءة أيضاً، حتى إن حقوقنا الحالية والمحدودة نوعاً ما في تحدي السياسات في الولايات المتحدة، تؤخر تنفيذ المشاريع لسنوات، في حين تقوم حكومات الأقطار الأكثر سلطوية بتخطيط وتنفيذ مشاريعها بأوقات أقصر بكثير. وقد تعني السرعة عدالة اجتماعية أوسع. فإكمال محطة نووية مثلاً ربما يعني معاناة أقل للفقراء نتيجة تطور اقتصادي أوسع. وعلى أي حال فكلما جعلنا العملية ذات صيغة ديمقراطية أكثر وضوحاً، كلما كان دوران الدواليب أبطأ وهذا ما سيؤدي إلى معاناة.

وربما يكون أفضل الخيارات اتباع مسار متوسط. فيبدأ مسؤولو الحكومة مثلاً

بتحديد الأهداف الاجتماعية الأساسية للتطوير التكنولوجي. وجعل هذه على الآراء واسعة الانتشار ترتكز على عدالة التوزيع، وربما تجري صياغتها بمساعدة فلاسفة أخلاقيين وعلماء اجتماع والجمهور. وسينفذ محللو القرارات عند ذلك دراسات RCBA (بطريقة الخيار المعبّر عنه، أو الموزون أخلاقياً، أو ببعض الدمج للمنهجين الدراسيين) لطرح مترتبات مشروع معين. وبافتراض عدم وجود انتهاك للمعايير الأخلاقية ستتمكن محكمة علم بشكل من الأشكال من سماع أي نقاشات حول جدوى ووَقع التكنولوجيا المُقترحة. وسيستخدم تقرير المحكمة مع RCBA من قبل صُناع السياسة الذين يستشيرون عدد من المستشارين في مختلف الاختصاصات الاجتماعية والعلوم الفيزيائية. ويجتمعون كذلك مع لجنة تتألف من مواطنين عاديين. وبإمكان لجنة المواطنين تبعاً لأحد الاقتراحات (Hiskes and Hiskes, 1986) أن تصقل خيارات السياسة وتساعد صنّاعها على تحديد ووزن الأدلة كافة. وعند تلك النقطة سيقوم المسؤولون الحكوميون باتخاذ القرارات السياسية الأكثر رصانة.

ورغم أن مثل هذا النظام قد يعمل في طريقة كفوءة وعادلة مع أخذ مقيدات وحقائق المجتمع الديمقراطي بمنظور الاعتبار، يبدو من غير المتوقع أن نراه يطبق في زمن قريب في الولايات المتحدة وفي الديمقراطيات الصناعية الأخرى. إن التعقيدات التي لا يمكن في الحقيقة نكرانها والتي تعتري اتخاذ القرار المتعلق بالتكنولوجيا يمكن أن تترك المرء حذراً من تبني نظام يصنع سياسة. وربما يوضح هذا سبب عدم وضع نظام نهائي حول هذا الموضوع حتى اليوم. ونستمر بدل ذلك نجرب أساليب كيفما اتفق نوازن فيها بين الكفاءة والديمقراطية، وبين سلطة الحكومة وحقوق الأفراد ورأي الخبراء مع تصورات الرأي العام.

المراجع التي تخص المعايير

Cassedy, E. S. Winter «Health Risks Valuations Based on Public Consent». *IEEE Technology and Society Magazine* 1992-3. pp. 7-16.

Grossman, P. Z. and E. S. Cassedy. «Cost-Benefit Analysis of Nuclear Waste Disposal: Accounting for Safeguards.» *Science, Technology and Human Values*: vol. 10, no.4, pp. 47-54, 1985.

Hapgood, F. «Risk-Benefit Analysis - Putting a Price on Life.» *The Atlantic*: Jan. 1979. pp. 33-38

Hiskes, A. L. and R. P. Hiskes. Science, *Technology and Policy Decisions*. Boulder, CO: Westview Press, 1986.

Hund, G. E. «The Fault of Uncertainty.» *Science, Technology and Human Values* :vol. 2, no.4, 1986. pp. 45-54.

Kantrowitz, A. «Controlling Technology Democratically.» *American Scientist:* vol. 63, Sept.-Oct. 1975, pp. 505-509.

Laski, H. *The Limitations of the Expert*. London: The Fabian Society, 1931. (Fabian Tract No. 235)

MacLean, D. and P. G. Brown (eds). *Energy and the Future*. Totowa, NJ: Rowan and Littlefield, 1983.

Michalos, A. C. «A Reconsideration of the Idea of a Science Court.» in: P. Durbin, (ed.). *Research in the Philosophy of Technology*. Greenwich, CT: JAI Press, Vol. 3, 1980. pp. 10-28.

Mill, J. S. *On Liberty*. Indianapolis: Bobbs-Merrill, 1947.

Mishan, E. J. *Eonomics for Social Decisions*. New York: Praeger, 1972.

Mishan, E. J. *Cost-Benefit Analysis*. New York: Praeger, 1976.

Mishan, E. J. *Introduction to Normative Economics*. New York: Oxford University Press, 1981.

Okrent, D. «Comment on Societal Risk.» *Science*: vol. 208, 25 April 1980. pp. 372-375.

Raiffa, H. *Decision Analysis: Introductory Lectures on Choice Under Uncertainty*. Reading, MA.: Addison-Wesley, 1970.

Rawls, J. *A Theory of Justice*. Cambridge, MA: Belknap Press, 1971.

Rhoads, S. E. (ed.). *Valuing Life: Public Policy Dilemmas*. Boulder, CO.: Westview Press, 1980.

Ricci, P. F. and L. S. Molton. «Risk Benefit in Environmental Law.» *Science*: vol. 214, 4 Dec. 1981. pp. 1096-1100.

Shrader-Frechette, K. S. *Nuclear Power and Public Policy*. Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1983.

Shrader-Frechette, K. S. *Science Policy, Ethics, and Economic Methodology*. Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1985.

Starr, C. «General Philosophy of Risk-Benefit Analysis.» in: Energy and the Environment. New York: Pergamon, 1976.

Wilson, R. and E. Crouch. *Risk/Benefit Analysis*. Cambridge, MA: Ballinger, 1982.

المراجع التي تخص الأخلاقيات

Barry, V. *Applying Ethics*. Belmont CA: Wadsworth, 1985.

Brandt, R. B. *Ethical Theory*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1959.

Frankena, W. K. Ethics. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1973.

Nozick, R. *Anarchy, State and Utopia*. New York: Basic Books, 1974.

Wenz, P. S. *Environmental Justice*. Albany, NY: State University of New York Press, 1988.

الملحق ج

موجز عن التكنولوجيات الجديدة

الكفاءة التقنية

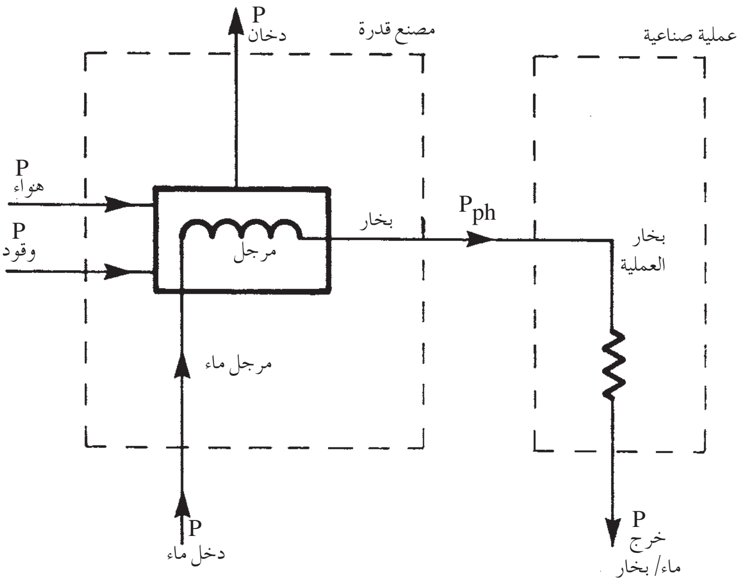
يمكن فهم الحفاظ على الطاقة، كما لاحظنا في الفصل الرابع، على أنه يعني استبدال المصادر المختلفة أو الاستغناء عن الطاقة أو الكفاءة التقنية والتي سنركز عليها هنا.

إن أفضل طريقة للنقاش حول الكفاءة التقنية هي بالرجوع إلى قوانين الثيرموديناميكا (الملحق أ). فقانون الثيرموديناميكا الأول ينص على أن الطاقة لا تُفنى ولا تُستحدث وبإمكانها فقط أن تغير شكلها أو أن تخزن وقتياً. وتميل الطاقة تبعاً للقانون الثاني للثيرموديناميكا إلى التحول من أشكال متاحة لأداء عمل مفيد وانتقالها إلى أشكال أقل توافراً لأداء عمل آخر.

تعرف كفاءة المنشأة الحرارية عادة تبعاً للقانون الأول. فالمنشأة الحرارية تزود حرارة مفيدة إما لمرحلة في عملية صناعية أو لماكينة حرارية مثل التوربين الحديث. تقتصر كفاءة المنشأة على مقارنة المُخْرَج المفيد (حرارة مفيدة أو كهرباء) مع مُدْخل الوقود كمقياس عملي لأفضل استخدام للوقود.

ويبين الشكل ج.1 مدخلات ومخرجات الطاقة لعملية تسخين صناعية في إحدى المنشآت. ويمكن مقارنة هذا الشكل مع الشكل أ.1 وهو مخطط مشابه لمحطة قدرة كهربائية. ونستطيع لكلتا المنشأتين تشخيص مُدخل وقود ومُخرج طاقة مفيدة وخسائر. وبإمكان كلتا المنشأتين الحراريتين تقليل مُخرج الحرارة غير المفيدة وبذلك تقوم باستخدام أفضل لمدخل الوقود. ويجري إنجاز ذلك بواسطة تكنولوجيا استرداد الحرارة، كما هو مبين في الشكل ج.2، حيث يجري استخدام مسترجع الحرارة على مخرج ماء/ بخار المعالجة والمقتصد على مخرج المدخنة (غازات

ساخنة). وكل من هاتين الأداتين هي مبادل حراري تقوم بنقل جزء من الحرارة المتدفقة خارجاً لغرض التسخين المسبق للماء والهواء الداخلين (وهذه الأدوات ليست جديدة لكنها كانت مهملة حتى عهد أسعار الوقود العالية). إن استخدام استعادة الحرارة يمكّن من زيادة الطاقة المفيدة المنتجة لكمية وقود المدخل نفسها أو بعبارة أخرى يمكننا الحصول على نفس المخرج المفيد بمدخل وقود أقل. وكلا النوعين من الاستعادة يؤدي إلى تحسين كفاءة المنشأة.



الشكل ج ـ أ

منشأة معالجة حرارية صناعية (من دون استرداد للحرارة)

$$P_{\text{دخل}} = P_{\text{وقود}} + P_{\text{دخول}} + P_{\text{دخل ماء}}$$

و حرارة المعالجة، معدل انتقال الحرارة = P_{ph}

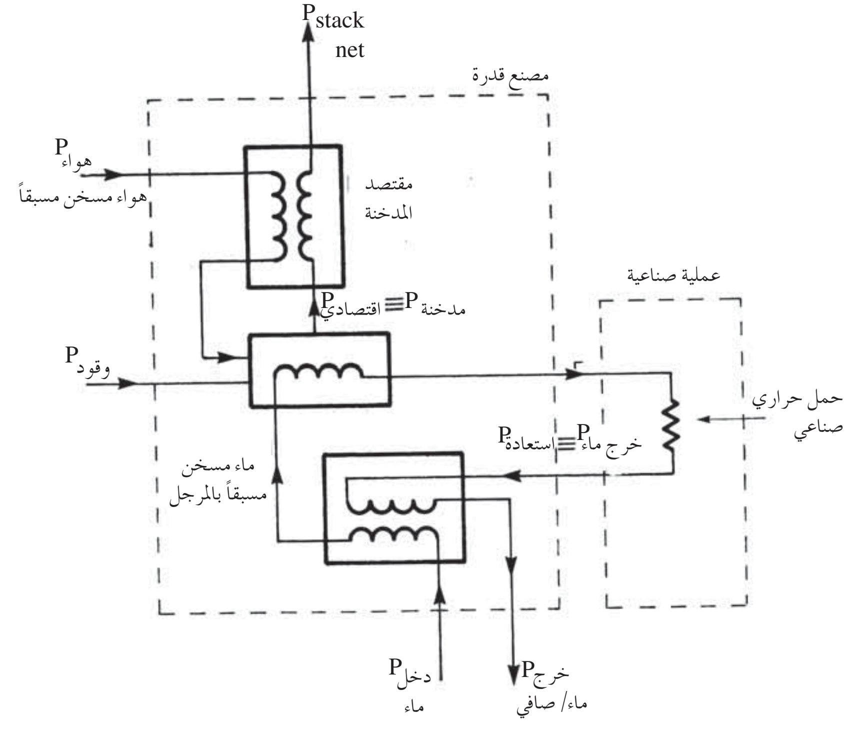
$$\approx P_{\text{وقود}} + P_{\text{خرج}}$$

$$= P_{ph} + P_{\text{خرج ماء/ بخار}}$$

$$\text{كفاءة مصنع القدرة} = \eta = P_{ph} / P_{\text{وقود}}$$

ومع ذلك هناك حدود للكفاءة. نتيجة القانون الثاني للثيرموديناميكا وكلما أعطى البخار الذي لا يترك الدورة حرارة أكثر منه فسنتوقع انخفاض درجة حرارة المخرجات. غير أن درجة حرارة المخرجات لا يمكن أن تهبط دون درجة حرارة الماء أو الهواء المحيط بالمنشأة لأننا في تلك الحالة سوف لن نستطيع نقل أي حرارة

إليه. لذا ندرك أن درجة الحرارة الخارجية تضع حداً نظرياً على مقدار طاقة درجة الحرارة المنخفضة التي يمكن استردادها. ورغم ذلك فإن أنظمة استرداد الحرارة عادة ما تسترد ما لا يقل عن 8 في المئة من الحرارة الإضافية المفيدة اعتماداً على كفاءة المرجل والمنظومة. كما يمكن عادة تحسين كفاءة نظام تسخين معالجة صناعية أساسي من 87 في المئة إلى ما يقارب 95 في المئة.



الشكل ج ـ 2: الكفاءة التقنية مع حرارة عملية المعالجة الصناعية

P اقتصاد = وتيرة انتقال الحرارة في مدخل مقتصد المدخنة

P استعادة = وتيرة انتقال الحرارة في مدخل مسترد الحرارة

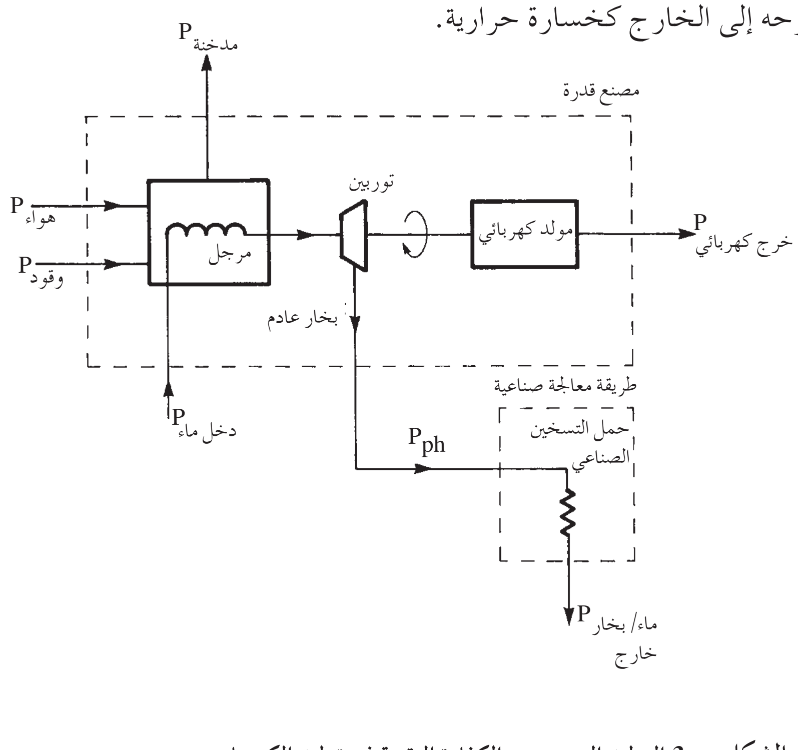
وتعطينا هذه الاعتبارات الثيرموديناميكية منظوراً داخلياً في تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل ميكانيكي وكهرباء (الشكل أ ـ1). والشغل الميكانيكي هو بالطبع التأثير الناجم عن البخار ذي الضغط العالي على شفرات التوربين والتي بدورها تدوّر محور المولد الكهربائي. وتحدد الكفاءة التي يمكن للمحطة الحرارية أن تؤدي بها شغلاً مفيداً بطريقة مشابهة بالحدود العليا والدنيا لدرجات الحرارة للمنشأ، كما يعبّر عن

ذلك في دورة كارنو. ومهمة دورة ماء التبريد بالمقابل هي خفض مستوى الحرارة الدنيا (T_L) في دورة محطة القدرة. تذكر من الملحق (أ) أن

كفاءة كارنو = T_L - T_H/ T_H

وهكذا إذا انخفضت T_L فسترتفع الكفاءة. وبطريقة مشابهة كلما ارتفعت درجة حرارة البدء كلما ارتفعت الكفاءة المثالية المحددة (كفاءة كارنو) للمحرك الحراري. والحد الأعلى العملي لدرجة الحرارة تحدده نوعية المواد ومقدرتها على تحمل درجة الحرارة والضغط العاليين وتحمل خسارة أعلى للحرارة.

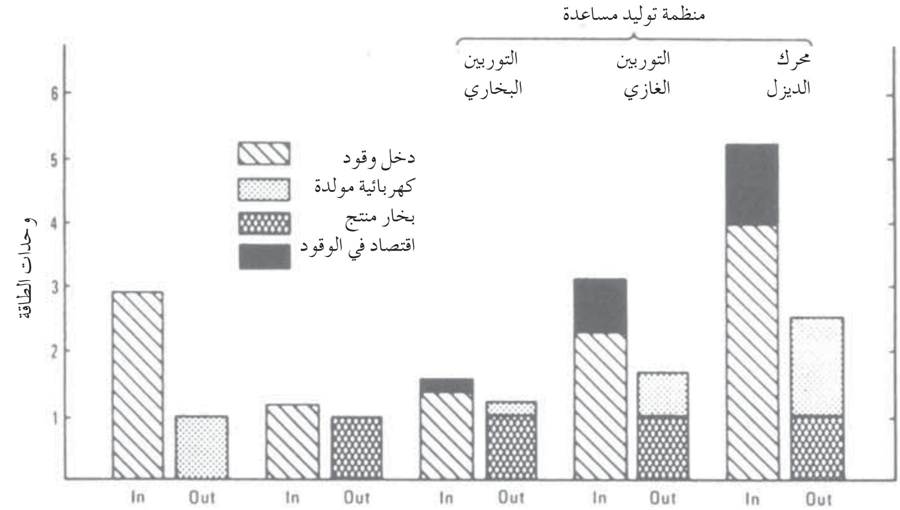
وهناك تحسن كبير في مخرج الطاقة المفيد نتيجة التوليد المزدوج (الشكل ج-3). فكل من الكهرباء وحرارة المعالجة الصناعية هما مخرجان. وفي النوع الخاص المبين في الشكل ج.3 يستخدم بخار العادم منخفض درجة الحرارة للتسخين الصناعي بدل طرحه إلى الخارج كخسارة حرارية.



الشكل ج ـ 3 التوليد المزدوج – الكفاءة التقنية في توليد الكهرباء

$P_{\text{خرج}} = P_{\text{خرج كهرباء}} + P_{\text{تسخين}} + P_{\text{مدخنة}} + P_{\text{خرج ماء/ بخار}}$

ويمكن أن ينجم عن نظام توليد بخاري مزدوج توفير في الوقود يبلغ نحو 16 في المئة مقارنة بالإنتاج المنفصل للمقدار نفسه من حرارة التسخين الصناعية والكهرباء.



الشكل ج-4: مقارنة الأداء – لأنظمة التوليد المزدوج. مدخلات ومخرجات الطاقة لعينات من تكنولوجيات التوليد المزدوج.

يمثل التوفير في الوقود (المناطق السوداء) الاختلاف بين استهلاك الوقود من قبل أي نظام توليد مزدوج والوقود الذي سيكون مطلوباً في ما لو استخدمت معدات منفصلة لإنتاج المقادير نفسها من الكهرباء والبخار. وتبدو من اليسار إلى اليمين مدخلات ومخرجات كل من نظامي طاقة تقليديين وثلاثة أنظمة توليد مزدوج. فالمدخل والمخرج إلى اليسار هو التوليد المزدوج للكهرباء بواسطة البخار أي باستخدام مرجل وتوربين بخاري بمخرج قدرة وحدة طاقة واحدة ومدخل قدرته 2.9 وحدة (الكفاءة = 0.34). المزدوج التالي هو لمدخل/ مخرج بخار عمليات معالجة صناعية تقليدي مستخدماً مرجلاً بخارياً فقط ومخرج قدرة وحدة طاقة واحدة ومدخلاً قدره 1.15 وحدة (الكفاءة = 0.87). أما الأزواج الثلاثة التالية فهي لأنظمة توليد مزدوجة تستخدم على التوالي توربين بخاري فتوربين غازي فماكنة ديزل. وكمية بخار المعالجة المنتج في كل حالة توليد مزدوج هو نفسه أي وحدة طاقة واحدة. يضاف إلى مخرج البخار لكل حالة، الكهرباء المنتج الذي يختلف بحسب الطريقة. فالتوربين البخاري يوفِّر أقل كمية بينما يوفِّر الديزل أكبر كمية. ويظهر مدخل طاقة الوقود لكل مخرج مزدوج مخططاً بينما تظهر كمية الوقود الموفر باللون الأسود في حالة القيام بتوفير المخرجات نفسها منفصلة. والتوفيرات في الوقود هي من اليسار: 16 في المئة و27 في المئة و24 في المئة لتكنولوجيات التوليد المزدوجة الثلاث.

مقتبس بسماح من: Annual Review of Energy, vol. 3© 1978 by Annual Reviews Inc., article by R. H. Williams, «Industrial Cogeneration».

وهذا ما يصوره الشكل ج ـ 4 حيث تقارن منشأة التوربين البخاري بالتوليد المزدوج لأنظمة التوربين الغازي والديزل التي يمكنها توفير 27 في المئة و24 في المئة على التوالي. ويعتمد كون نظام التوليد المزدوج استثماراً اقتصادياً من عدمه على كلفة المعدات (بما في ذلك التحويل) والوقود. ويجب أن نلاحظ أن التوليد المزدوج في العديد من الحالات – كما في حالة المستخدمين الكبار للطاقة الصناعية –برهن على كونه تكنولوجيا تؤثر في الكلفة.

التوليد الكهرومائي في المجال الصغير

تمتلك منشآت التوليد الكهرومائي الصغيرة سعة إنتاجية لا تزيد عن 30 ميغاواط (كهرباء) وعادة ما تتراوح بين 5 و15 ب (كهرباء). وكما رأينا في الفصل الثالث فإن المنشآت الكهرومائية الصغيرة تستغل المساقط المائية الصغيرة وتعمل إلى درجة كبيرة بواسطة جريان النهر فضلاً عن ضغط ارتفاع المسقط المائي من وراء السد.

ومن الممكن في الولايات المتحدة توسيع السعة المائية إذا ما جرى تطوير المواقع المائية الصغيرة. وتبلغ السعة الكامنة في ولايات الشمال الشرقي وحدها للمنشآت المائية الصغيرة نحو اثنتي عشرة منشأة نووية سعة الواحدة نحو 1000 ميغاواط (كهرباء). ويمكن خلال الولايات الثمان والأربعين على البر القاري توفير قدرة مائية تقدر بنحو 75000 ميغاواط من قدرة الكهرباء الإضافية (انظر الشكل 2-13) وذلك من خلال المنشآت المائية الصغيرة في أغلب الحالات. ويمكن للمنشأة المائية الصغيرة أن تكون مفيدة بصورة خاصة في المناطق التي يوجد فيها طلب لزيادة سعة المنظومة الكهربائية خلال فترة قصيرة نسبياً وذلك لأن فترة بنائها لا تتجاوز سنتين أو ثلاث.

والسبب الرئيس لتبني (أو إعادة تبني) المولدات الكهرومائية الصغيرة هو بالطبع كلفتها. فالكلفة الرأسمالية لمثل هذه المنشآت تفوق مثيلاتها من المنشآت الحرارية غير أن كلف التشغيل/ الصيانة المتدنية وعمر المنشأة الطويل وعدم وجود أي كلفة للوقود غالباً ما تعطي أفضلية في الكلفة لهذه المنشآت مقارنة بالمنشآت الحرارية. وإذا ما فكرنا في كلفة التوليد الإجمالية للمحطات المائية الصغيرة – مختزلة إلى كلفة الكيلوواط – ساعة ـ سنجد أن الكلفة تتراوح بين 1.5 و6.4 سنت/ كيلوواط – ساعة. وذلك كما رأينا في الفصل التاسع يقارن (الجدول 9-2) بنحو 4 سنت للفحم و5 سنت

(أو أكثر في الأغلب) للمحطات النووية لنفقات التوليد الإجمالية (بدولارات سنة 1979 الثابتة).

وقد يكون التردي البيئي أحد العوائق أمام تطوير التوليد الكهرومائي حيث يعني البناء إرباكاً للمواطن الحيوانية/ النباتية الطبيعية أو لمناطق الترفيه. غير أن الأثر البيئي للمحطات الكهرومائية الصغيرة يعتبر قليلاً نسبياً مقاساً بالمنشأة الصغيرة في كل موقع وبسبب وجود سدود في معظم المواقع حالياً. وسيحسن تشغيل المحطات المائية الصغيرة البيئة في بعض الحالات لأنه يقوم بتنظيم المنشآت التي كانت مهملة ومتروكة من دون أي إصلاحات.

استخراج النفط المعزز

يشمل الاستخراج المعزز للنفط وسائل لاستخراج موارد إضافية من حقول النفط المكتشفة والمستنفدة. ويعتمد مقدار المورد القابل للاستخراج، كما بحثنا في الفصل الثاني، على تكنولوجيا الاستخراج مثلما يعتمد على كميته في الموقع.

إن استخراج النفط ليس بسهولة سحب الماء من بئر. فالنفط عادة مطمور في تشكيلات صخرية مسامية. وهذه التشكيلات تقع تحت ضغوط من التشكيلات الجيولوجية التي فوقها والتي تحيط بها ومن قبل تشكيلات الغاز الطبيعي المصاحبة في الأغلب. وعندما يجري الحفر في التشكيل الحاوي على النفط لأول مرة يجري إحداث فرق ضغط عند نقطة الحفر حيث يكون الضغط مساوياً للضغط الجوي (في حين يمتلك التشكيل المحيط ضغطاً جيولوجياً أعلى). ويسبب فرق الضغط هذا نزوح النفط خلال التشكيلات الصخرية نحو ثقب البئر المحفور. وما إن يصل النفط إلى البئر يتدفق إلى السطح بسبب ضغطه الطبيعي. وعندما يكون الضغط الطبيعي عالياً بصورة كافية فسيثور البئر في ما يعرف بالتدفق الأسطوري.

وإذا لم يكن الضغط الطبيعي كافياً لدفع النفط إلى السطح خلال البئر كما يحدث عادة مع الآبار القديمة فمن ثم يجب اتباع وسائل أخرى لإجبار النفط على التدفق. وتصنف تقنيات استخراج النفط إلى أولية وثانوية وثالثية. ينحصر الاستخراج بالطرق الأولية في التدفق الطبيعي للنفط من فوهة البئر بسبب وجود ضغط جيولوجي كافٍ،

وينطبق أيضاً في عملية الضخ البسيطة التي تصبح ضرورية عندما ينخفض الضغط.

وعند تدهور الضغط بدرجة أكثر يبدأ العمل بالممارسات الثانوية. فقد يجري إغراق المكمن النفطي بالماء لإدامة الضغط ولإزاحة النفط نحو البئر. ومن الممكن عادة استخراج نحو ثلث النفط في حقل ما بواسطة التقنيات الأولية والثانوية. ونادراً ما كان الاستخراج في الحقبة السابقة لاستثمار النفط يستمر في ما بعد المرحلة الثانوية. ومع تناقص الاحتياطي النفطي في الولايات المتحدة ومع تصاعد أسعار النفط المستورد أصبحت الطرق الثالثية أو طرق الإنتاج المعزز ذات جذب أكبر.

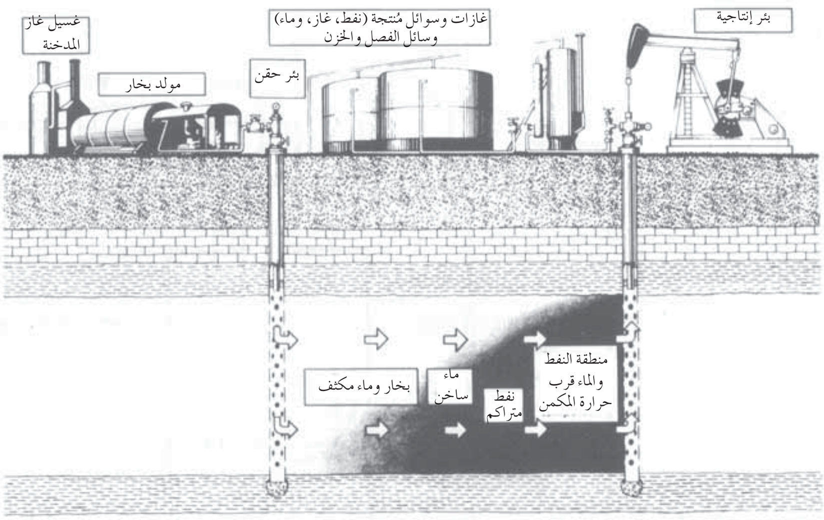
ويزيد استخدام تكنولوجيات الإنتاج المعزز من كمية المورد النفطي القابل للاستخراج. لذا وضعت وزارة الطاقة في الولايات المتحدة هدفاً لتوسيع الاسترداد الإجمالي النهائي لموارد الولايات المتحدة من النفط بمقدار يتراوح بين 18 إلى 52 مليار برميل إضافي.

وتستخدم تكنولوجيات الاستخراج النفطي المعزز عادة الحرارة والكيميائيات والضغط الخارجي لاستخراج كميات إضافية من النفط. ويجري تطبيق هذه الأساليب بعدد من التقنيات بما فيها حقن البخار والحرق الموقعي والحقن الكيميائي. وسيقتصر الكلام على التقنية الأولى فقط.

يبين الشكل ج ـ 5 مخططاً لحقن البخار كطريقة للاستخراج المعزز. هناك إلى اليسار مولد للبخار وهو مرجل اعتيادي. ويحقن البخار في التشكيل النفطي من خلال أنبوب مثقب. ويسبب البخار تحت الضغط دفع الماء الساخن للنفط مزيحاً إياه نحو ثقب البئر. وتساعد الحرارة الحركة تحت الأرض فهي تقلل لزوجة النفط وبعد أن يصل النفط إلى البئر يجري ضخه إلى السطح ومعالجته لفصل الماء ثم إرساله بالأنابيب إلى المصافي.

ولما كانت الطرق الثالثية تتطلب حرق بعض الوقود ـ وهو عادة بعض من النفط المستخرج ـ يجب إضافة كلفة كل برميل أحرق إلى كلفة الإنتاج، وذلك ما يرفع الكلفة الصافية للمنتوج. وقد جعلت الكلفة الإضافية للإنتاج النفط المستخرج بطرق الإنتاج المعزز في أواسط وأواخر الثمانينيات غير تنافسي. ومع ذلك يتوقع أن يصبح

النفط المنتج بالتقنيات الثالثية تنافسياً في الأسواق العالمية عندما تبدأ الموارد العالمية تستنفد خلال العقود القادمة. وسيتوضح هذا التوجه من وتيرة الاكتشافات المتناقصة أو بسبب الكلف المتزايدة للاكتشاف (انظر الفصل الثاني). وعند ذلك سيصبح الاستغلال الثالثي للحقول النفطية الأقدم ذا جدوى اقتصادية.



الشكل ج-5: استخراج النفط المعزز بحقن البخار

المصدر: Energy technologies and the environment,

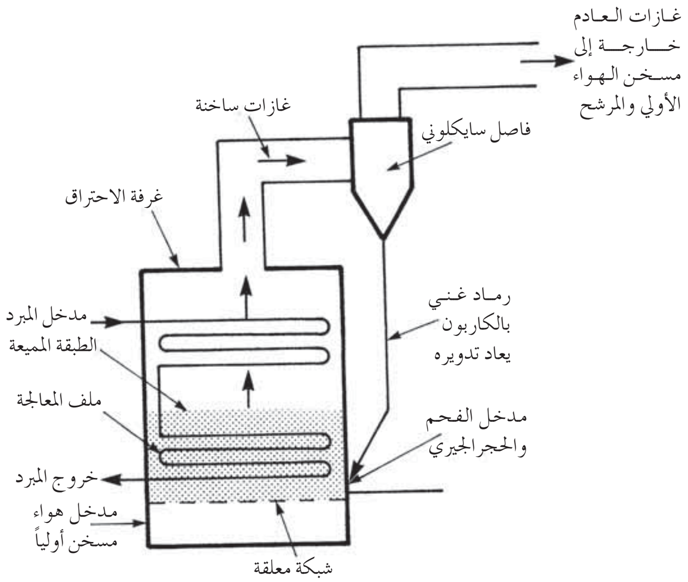
June 1981, U.S. Dep. of Energy, Report No. DOE/ EP0026 .

available from National Technique Information Service Springfield VA 22161.

احتراق الطبقة المميعة

بحثنا في الفصل السادس عن الطرق المعاصرة للتقليل من تلوث الهواء من الفحم بما في ذلك غسل الفحم والمرشحات القماشية وإزالة كبريت غاز المدخنة (بواسطة الغاسلات). وتركز بعض المفاهيم الحديثة على حرق الفحم بطريقة أكثر كفاءة بدل غسله أو غسل غازات الاحتراق خصوصاً خلال ما يعرف باحتراق الطبقة المميعة (FLUID– BED COMBUSTION). وهذه التكنولوجيا حالياً في مرحلة الانتقال من العرض إلى المرحلة التجارية (الفصل العاشر).

يبين الشكل ج -6 تشغيل مرجل يعتمد احتراق الطبقة المميعة. يحدث الاحتراق في طبقة من جسيمات الفحم المتحركة والمعلقة بواسطة تيارات الحمل الطبيعية للغازات الساخنة الناجمة عن الاحتراق وكذلك من حركة الهواء القسرية خلال منطقة الطبقة. إن استحداث منطقة من الجسيمات المعلقة له عدة منافع:



الشكل ج-6: احتراق الطبقة المميعة – شكل تخطيطي

المصادر: Energy technologies and the environment, June 1981 U.S. Dept. of Energy, Report No. DOE/EP0026

Availbale from National Technical Information Service Springfield, VA 22161.

درجة حرارة الاحتراق أدنى مما في طبقة ساكنة مما ينتج منه تفاعل كيميائي أقل للنيتروجين الجوي للتحول إلى أكاسيد النيتروجين.

يضاف حجر الكلس ولإنتاج تفاعل أكثر اكتمالاً للكبريت مع رماد الفحم (القاعدي) وبذلك يقلل انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت بدرجة كبيرة جداً.

يمكن فصل جسيمات الفحم غير المحترقة (ناعمة) عن غاز العادم وإعادة حقنها لتحترق.

ويعمل نظام الاحتراق في الطبقة المميعة بصورة شاملة كما في (الشكل ج ـ7) كالتالي:

ينقل الفحم من مخزنه ويطحن إلى حجم جسيمة أقل من ربع إنش قطراً ويدفع إلى غرفة الاحتراق.

يدفع الهواء المسخن مسبقاً ألى الأعلى في غرفة الاحتراق من خلال البنية الشبيهة بالمشبك من الأسفل.

يدفع حجر الكلس المطحون مع الفحم المطحون في غرفة الاحتراق للتفاعل مع الكبريت في الفحم.

يحدث احتراق جسيمات الفحم فوق المجال العمودي لمنطقة الطبقة إلى الأعلى والأسفل من نقطة التغذية.

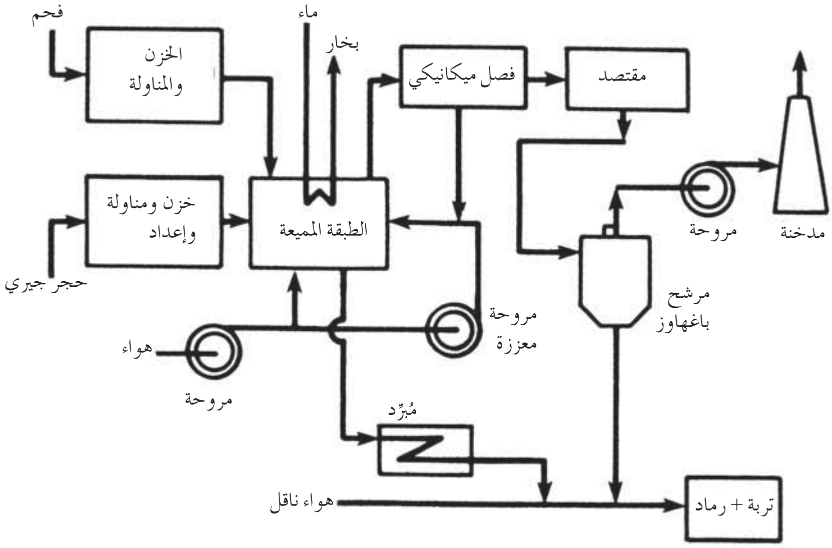
تسقط بعض جسيمات الرماد الأثقل خلال المشبك إلى الأسفل (الشكل ج ـ 6) وتجري إزالتها غير أن الكثير من الجسيمات تأخذها غازات العادم.

يمكن فصل جسيمات الفحم الصغيرة غير المحترقة من غازات العادم في فاصل ميكانيكي (فاصل سايكولوني في الأغلب مثلما في الشكل ج.6 والذي يعمل على قوى النبذ عن المركز) ويعاد تغذيتها لتحترق وبصورة مكتملة.

تجمع الجسيمات الدقيقة الأخرى بما فيها الرماد من غاز العادم بواسطة مرشحات من القماش أو بواسطة مرسبات كهروستاتيكية قبل السماح لغاز العادم بالجريان إلى المدخنة بصورة طبيعية أو قسرية.

وقد بيّن تشغيل الاحتراق بالطبقة المميعة (من دون غاسلات) معايير وكالة الحماية البيئية لأداء المصادر الجديدة المتعلقة بانبعاث ملوثات مثل ثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين. إن إزالة انبعاثات الكبريت يتم بنسبة 90 في المئة تقريباً ويحدد الانبعاث إلى 1.2 باوند أو أقل من ثاني أكسيد الكبريت لكل مليون وحدة حرارية بريطانية يتم توليدها. كذلك فإن انبعاثات أكاسيد النيتروجين كانت تشكل نصف

المستوى الاتحادي الأعلى. ويبقى انبعاث الجسيمات الدقيقة مشكلة فقط بالنسبة إلى وكالة الحماية البيئية كما هي الحالة مع تكنولوجيات الاحتراق الأخرى.



الشكل ج-7: نظام مرجل الطبقة المميعة

المصادر: Energy Technologies and the Euriroument, June 1981, US Dept. of Energy, Report No. DOE/ EP0026.

متوافر عن طريق: National Technical Information Service, Springfield, VA22161.

ويتوقع ازدياد تبني مراجل الطبقة المميعة للاستخدامات الصناعية وكذلك لتوليد الكهرباء في التسعينيات. وقد قامت عدد من شركات الكهرباء في نهاية الثمانينيات بتشغيل عدد من المشاريع الكبيرة التي تستخدم هذه التكنولوجيا. وهي طريقة يمكن أن تكون بديلاً ذا جدوى من حيث الكلفة لتكنولوجيا الغسل الحالية لأنها تدفع كلفتها ولو جزئياً من خلال كفاءة حرارية أعلى. ويمكن لاحتراق الطبقة المميعة أيضاً أن يساهم بطريقة ملموسة تكنولوجياً في وضع حل للجدل القائم حول المطر الحامضي إذا ما اعتقد بضرورة تخفيض مستويات الكبريت والنيتروجين إلى حدود أقل.

استرداد الموارد

كان الاعتقاد السائد في السبعينيات أن استرداد الموارد من النفايات البلدية الصلبة يقترب من مرحلة الاستثمار التجاري. وكانت منشآت ريادية في أكثر من عشرين مدينة تقوم بتوفير الطاقة واسترداد المواد من النفايات البلدية. وتعرف النفايات البلدية بأنها نفايات الدور السكنية والمباني التجارية. وكمية هذه النفايات التي تتكون في الولايات المتحدة هائلة (اكثر من 150 مليون طن في السنة) وهي في تزايد. ولم يقتصر سبب الزيادة على النمو السكاني، بل إن زيادة المادة التي يخلفها الفرد الواحد في ازدياد أيضاً.

ويبين الجدول رقم ج ـ1 النسب المئوية لأنواع المواد في مخلفات بلدية عادية.

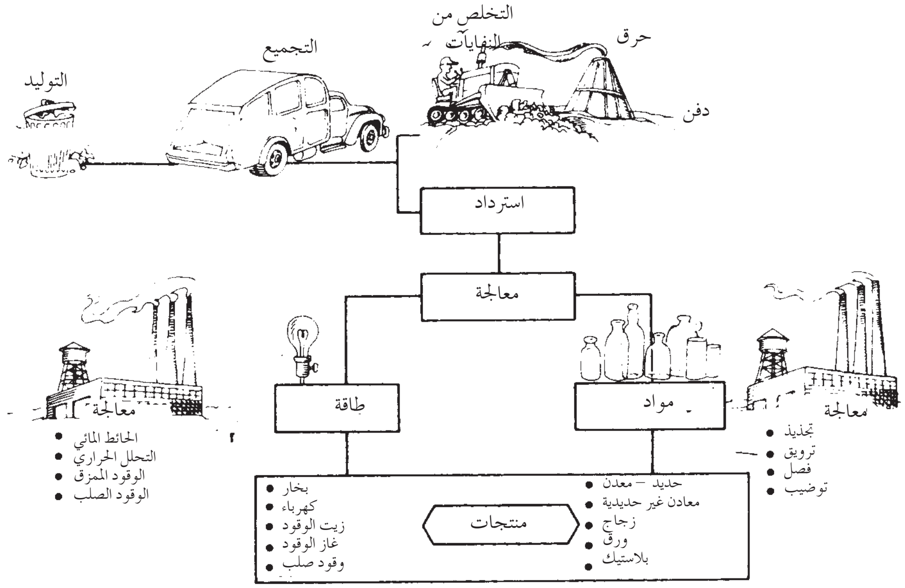
الجدول ج رقم 1: محتويات النفايات البلدية الصلبة (وزناً)

نوع النفاية	النسبة المئوية عند الاستلام (أساس وزن جامد) المدى المتوقع	الاسمي
الورق	60− 37	55
ورق الجرائد	15 − 7	12
الورق المقوّى	18 −4	11
أنواع أخرى	37−26	32
المعدنيات عمودياً	10 −7	9
الحديدية	8 −6	7.5
غير الحديدية	2−1	1.5
الطعام	18 − 12	14
قماش وغزول	10− 4	5
خشب	4− 1	4
زجاج	12−6	9
بلاستيك	3−1	1
متفرقات	<3	3
محتوى الرطوبة: يتراوح بين 20 − 40 في المئة (اسمياً 30 في المئة)		

المصدر: مشتق من Recovery and Utilization of Municipal Solid Waste, US Environmental Protection Agency, Washington DC 1971.

وثلث المخلفات تقريباً قابلة للاحتراق وذات قيمة حرارية تبلغ عشرة ملايين وحدة حرارية بريطانية للطن الوحد. لذا تمثل النفايات البلدية الصلبة إذا ما استغلت بصورة كاملة كوقود مصدراً مهماً للطاقة الحرارية للقطر يبلغ نحو 1 كواد في السنة.

وإذا ما أدرجنا توفير الطاقة الممكن من المواد التي يمكن إعادتها في النفايات (المعادن والزجاج وما إلى ذلك) فيمكن أن يكون للنفايات البلدية الصلبة تاثير أكبر على الحفاظ الوطني.



الشكل ج- 8: تجميع ومعالجة النفايات البلدية الصلبة

المصادر: S. L. Blum, in: P. H. Abelson and A. L. Hammond, eds. Materials: Renewable and Nonrenewable Resources, p. 48. Reprinted with permission. Copyright © 1976 american Association for the Advancement of Science.

ويبين الشكل ج-8 عملية جمع النفايات البديلة الصلبة والتخلص منها أو استردادها وتقسم النفايات بين طاقة مستردة أو مواد مستردة. ومنتجات عملية فصل المواد هي:

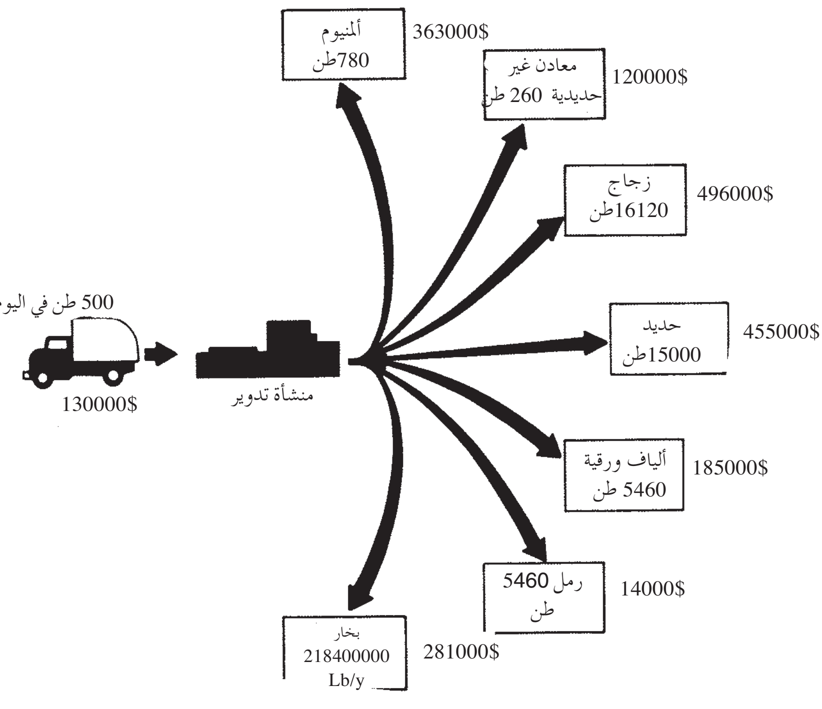
مواد حديدية – معظمها بشكل علب معدنية مغلونة

مواد معدنية غير حديدية – معظمها من الألمنيوم

زجاج – من القناني
ألياف ورقية من ورق الجرائد إذا ما جرى عزله عن المواد القابلة للحرق.

ونرى في الشكل ج-9 توزيع المواد من منشأة استرداد لنفايات بلدية افتراضية ذات سعة 500 طن في اليوم. ويمكن أن تباع المواد حيث توجد أسواق.

ويجري بعد فصل المواد استرداد الطاقة. وعادة يتم ذلك بحرق ما تبقى من النفايات البلدية مباشرة. ويجري تطعيم النفايات كإضافة إلى الفحم أو أي وقود تقليدي آخر لتوليد البخار في استخدامات المعالجة الصناعية أو للتدفئة البيتية في المنطقة أو لتوليد الكهرباء. إن مثل هذا الاستخدام لوقود النفايات سيخفض من كلفة توليد البخار من خلال تقليل مشتريات الوقود التقليدي.



الشكل ج-9: منتجات استرداد الموارد والدخل المتوقع (دولار سنة 1986)

مقتبسة من: O.J.hagerty, 1973, in: J. Pavoni, ed., Handbook of Solid Waste Dispposal- Material and Energy Recovery, R.E. Krieger, Co., Melbourne, FL.

والتحكم بالانبعاثات ذو أهمية خاصة لمنشآت استرداد الموارد (أو لمنشآت الحرق العادية) وذلك لأنها في معظم الأحيان قريبة جداً من المناطق السكنية. والاهتمام الرئيس في الانبعاث هو مع الجزئيات منتجات حرق المواد البلاستيكية (وخاصة كلوريد الهيدروجين من حرق البولي فينيل كلوريد أو ما يعرف باسم PVC). و قد استدعى هذا الاهتمام في الحقيقة ما يكفي من المعارضة الشعبية لإيقاف بناء منشآت استرداد الموارد ولإغلاق المنشآت العاملة. والوقود المستخلص من النفايات من ناحية أخرى ذو محتوى كبريتي أقل من الكثير من أنواع الوقود التقليدي مثل النفط أو الفحم حيث إن استخدام وقود مكمل من النفايات يقلل الانبعاثات ذات العلاقة بالكبريت.

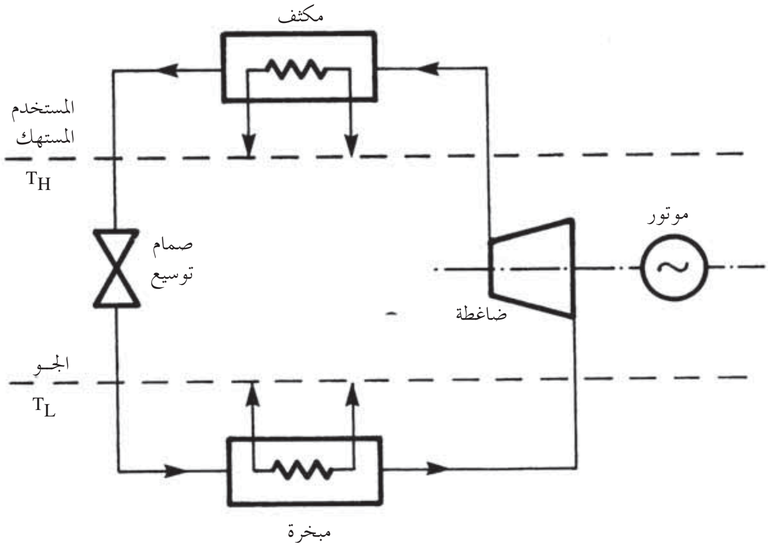
واجه استرداد الموارد مثل عدة تكنولوجيات أخرى قصيرة المدى بُحثت في الفصل العاشر عوائق في سبيل تبنيها. وتحدث هذه العوائق ضمن الوضع المؤسساتي للبلديات. فالبلدية تواجه مسؤولية جمع النفايات الصلبة والتخلص منها مهما كانت الظروف. وهذا المتطلب الأساسي على البلديات، ومن ثم على إمكانية التطبيق العملي لأي تكنولوجيا يقولب الطريقة التي تقيّم بها جدواها واقتصادياتها. والعامل الأكثر بداهة في تقرير الجدوى هو موثوقية التكنولوجيا. فهل ستعمل بطريقة مستمرة؟ وهل ستعمل بطريقة مقبولة بيئياً؟ فالتوقفات المتكررة أو الطويلة من غير وسيلة بديلة للتخلص من النفايات يمكن أن تحدث تراكمات لا يمكن تحملها مع ما يصاحبها من مشاكل صحية وجمالية. لذا فإن عامل التجريبية ضمن عملية الابتكار (انظر الفصل العاشر) يصبح عاملاً حاسماً وكانت العديد من البلديات قد أحجمت عن الأخذ على عاتقها المجازفة بتكنولوجيا غير مثبتة.

والحقيقة أن منشآت استرداد الموارد كما نعرفها هنا توقَّف بناؤها في منتصف الثمانينيات. وحلَّ مكانها المحارق الكتلية التي أنتجت في أفضل الأحوال حرارة أو كهرباء صالحة للاستعمال لكنها لم تؤدِ إلا القليل في مجال فصل الزجاج والمعادن وورق الجرائد. ويبدو أن التوجه كان نحو الفصل عند المصدر أي إن البلديات ألقت بالعبء على عاتق مالك الدار وغالباً ما يكون ذلك تحت قرارات ملزمة على مستوى المدينة.

وقد انهارت عملية استرداد الموارد واقعياً لأسباب تكنولوجية ومؤسساتية. فالعديد من المنشآت الرائدة على الجانب التقني عانت مشاكل في المعالجة أو من حيث القيود البيئية. ورغم أن تلك المشاكل كانت قضايا هندسية ذات حلول واضحة إلا أن البلديات ومقاوليها بدوا غير قادرين على تخطيها.

المضخات الحرارية

تُستخدم الكهرباء للتدفئة الداخلية تقليدياً بواسطة تبديد الطاقة الكهربائية في مقاومة أومية (انظر الملحق أ). وتمثل المضخات الحرارية نوعاً من الحفاظ من خلال الكفاءة التقنية كما جرى بحثه في الجزء الأول من هذا الملحق. والمضخة الحرارية تعمل مثل مكيف هواء معكوس – فهي تأخذ الحرارة من الخارج وتحولها إلى الداخل. وتوفِّر هذه الطريقة تدفئة كهربائية للمجالات الداخلية بطريقة أكثر كفاءة من الطريقة التقليدية.



الشكل ج ـ 10: المضخة الحرارية. شكل تخطيطي

مقتبس من: E. Camatini, ed. (1976). Heat Pumps: Their Contribution to Energy Conservation, Kluwer Academic Publisher, Norwell, MA.

وتتألف المضخة الحرارية أساساً مثل الثلاجة أو مكيفة الهواء من ضاغطة ومبخرة ومكثفة وصمام تمدد (انظر الشكل ج ـ10). والضاغطة أمر ضروري من الناحية

الثيرموديناميكية – لأننا إذا أردنا أن ننقل الحرارة من جسم درجة حرارته منخفضة إلى جسم درجة حرارته أعلى ستبرز الحاجة لشغل ميكانيكي (انظر الملحق أ). وتؤدي الضاغطة عملها بواسطة ضخ مادة التثليج (مائع الشغل) من حالته البخارية بضغط واطئ إلى ضغط أعلى بحالة سائلة.

وتصبح مادة التثليج ساخنة بسبب الانضغاط ويحدث تبادل حراري إلى درجة حرارة الغرفة أو البناية في المكثفة. وتدخل مادة التثليج بعد مرورها في المكثف خلال صمام تمدد إلى مبخر يعمل بضغط منخفض. وتهبط درجة حرارة مادة التثليج خلال تمددها ويحدث التبريد ممتصاً الحرارة من حجم الهواء الذي يمر عبر المبخر (حتى وإن كان الهواء في الخارج بارداً إلا أنه مازال يحتوي على حرارة كامنة يمكن نقلها). ويعاد تسليط الشغل على مادة التثليج بواسطة الضاغطة وتستمر الدورة.

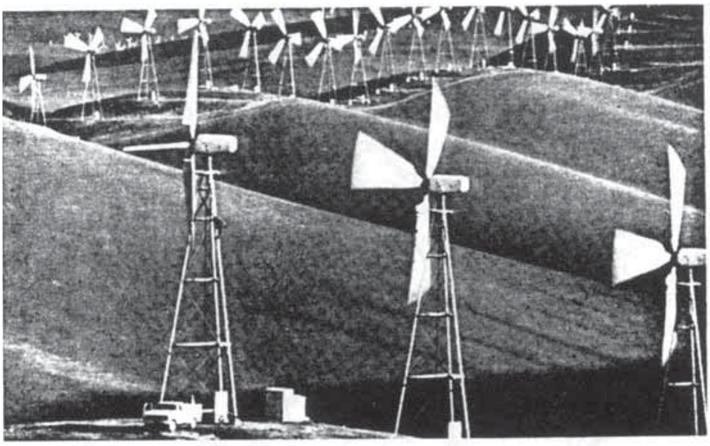
تقاس كفاءة المضخة الحرارية (أو الثلاجة) بواسطة معامل الأداء (Coeffecients of Performance) وهي النسبة بين كمية الحرارة المنقولة إلى كمية الشغل المطلوب للنقل من درجة الحرارة المنخفضة T_L إلى العالية T_H كما في الشكل C.10. ويقارب معامل الأداء للمضخات الحرارية العاملة اليوم عامل الاثنين تقريباً وهذا يعني أنه يحتاج وحدة واحدة من الطاقة تقريباً يصرفها بهيئة شغل ليعطي وحدتين من الطاقة الحرارية. أما التدفئة الكهربائية التقليدية فلها معامل أداء يبلغ واحداً مما يعني أن استهلاك الطاقة الكهربائية يبلغ ضعف ما تستهلكه المضخة الحرارية لكمية الحرارة المنقولة نفسها.

وقد كانت المضخات الحرارية متوافرة في الولايات المتحدة وأوروبا منذ عقد الخمسينيات. غير أن عملية نقلها إلى القطاع التجاري (الفصل العاشر) لم تتقدم بعيداً حتى السبعينيات. ويعود السبب جزئياً إلى أن الاستثمار الرأسمالي المطلوب لتركيب مضخة حرارية كان أكثر بكثير من الفرن ذي الحجم المماثل للنفط أو الغاز الطبيعي. ولم تبدُ التوفيرات في كلفة التشغيل واضحةً حتى أثناء أزمة الطاقة في السبعينيات. ومع ذلك فقد انتشرت هذه التكنولوجيا في السوق بصورة واسعة في السنين الأخيرة.

طاقة الرياح

كانت طاقة الرياح مستخدمة طوال التاريخ الإنساني المدون للإبحار وضخ الماء

وطحن الحبوب. فالطواحين الهوائية كانت معروفة بواحدة أو أخرى من أنواعها وكانت توفِّر طاقة للضخ والطحن في أقدم الحضارات الشرقية والمتوسطية، وكانت طاقة الرياح ذات أهمية كبرى في أوروبا حتى مع حلول الثورة الصناعية. ومع تطوير التكنولوجيات التي اعتمدت الوقود الأحفوري في القرن الثامن عشر والكهرباء في القرن التاسع عشر بدأ استخدام طاقة الرياح يتناقص باطراد. وفي حين بقيت طاحونة الهواء متعددة الرِّيش منظراً مألوفاً لضخ الماء في المناطق الريفية، تضاءلت مساهمة طاقة الرياح في أواسط القرن العشرين في اقتصاديات الدول الصناعية في العالم إلى حد لا يكاد يذكر. إلا أن الاهتمام بطاقة الرياح انتعش مع بدء أزمة الطاقة في السبعينيات. فقد تبين أن بإمكان الرياح المساهمة بصورة قيّمة في إنتاج الكهرباء.



الشكل ج -11 : مزرعة رياح في كاليفورنيا
بسماح من American Wind Energy Association

وقد بدأت المولدات الحديثة المسيّرة بالرياح اليوم بتزويد الكهرباء في شبكات كهرباء الخدمات ومواقع المستخدمين النائية حول العالم. وهي تكنولوجيا ناضجة غير أن لها محددات في صورتها النهائية وأهمها عدم استمراريتها. والقدرة الكهربائية المولدة من الرياح ذات جدوى من حيث الكلفة حالياً عند المواقع التي تتوفر فيها رياح «جيدة» أي حيث يبلغ معدل سرعة الرياح فيها نحو 12 ميلاً في الساعة على الأقل (انظر الشكل 10-2 الذي يبين مثل هذه المواقع في الولايات المتحدة). وكلف إنتاج الكهرباء في هذه المواقع الآن هي ضمن المدى التنافسي. ويبدو أن «مزارع

الرياح» المتألفة من عدد كبيرة من توربينات هوائية ذات حجم متواضع لها مستقبل لامع لتصبح جزءاً من مزيج من أنماط توليد الكهرباء وبخاصة في أميركا الشمالية وشمال أوروبا. ويبين الشكل ج-11 واحدة من هذه المزارع في تلال كاليفورنيا شرق مدينة سان فرانسيسكو.

أساسيات طاقة الرياح

توفِّر قدرة الرياح الحديثة كما القدرة المائية الحديثة الكهرباء بدل القدرة الميكانيكية. فالتوربين الهوائي الحديث له مجموعة من الريش تشبه إلى حد كبير مراوح محرك طائرة تدوّر مولد كهربائي. وهذه الريش مصممة على أسس انسيابية للرفع شبيهة بأجنحة الطائرة أو القوارب الشراعية التي تتبع اتجاه الرياح. ويجري إحداث قوى رفع على مطيار مستدق (مصمم على قاعدة مطيار جناح الطائرة) عندما تكون حافته الأمامية متجهة نحو الرياح القادمة بزاوية صغيرة. والرفع هو نتيجة اختلاف ضغط الهواء بين الطرفين ناجم عن اختلاف طول مساري الهواء عندما يتدفق حول المطيار. وتقوم قوة الرفع بتدوير ريش طاحونة الهواء لأداء خرج قدرة مفيد.

وخرج القدرة لمولد يعمل بقوة الرياح يتناسب طردياً مع مساحة ريش الطاحونة الهوائية وهي تقريباً المساحة التي يحددها دوران الريش. والحد الأقصى للقدرة من توربين رياح حديث يصل إلى ميغاواط واحد (كهرباء) لدوار قطره مئة قدم. وهذا يقابل تحويل الطاقة في عمود من الهواء يتحرك بسرعة 40 ميلاً في الساعة بتقاطع مع مقطع مساحته نحو 7000 قدم مربع.

وليس من الممكن كما هو متوقع تحويل مجمل القدرة المتوافرة في عمود متحرك مُحَددَ واحد من الهواء. وتبين النظرية الأيروديناميكية أن القدرة العظمى التي يمكن استخلاصها من مثل هذا التيار الهوائي تبلغ ضمن هذا المقطع نحو 59 في المئة من القدرة المتوافرة. والحد الأقصى لخرج القدرة لطاحونة هواء يعتمد على حجم الطاحونة الذي يحدده قطر دوارها.

لقد ربطنا خرج القدرة حتى الآن في بحثنا إما بسرعة الرياح النوعية أو إلى صنف القدرة الذي تعود إليه الطاحونة. وسرع الرياح متباينة، والحقيقة أنها متباينة جداً في

العديد من المواقع. لذلك السبب يجب أن يُعبّر عن قياسات إنتاج الطاقة بواسطة المحركات الهوائية (مثل قياسات نظم الطاقة الشمسية) بمعدل وتيرة الإنتاج المتوقع للطاقة (بالكيلوواط). وغالباً ما تقدم هذه المعلومة كمعدل القدرة لوحدة مساحة المقطع المغطى – مقاسة بمعدل واط لكل متر مربع، لمختلف المواقع.

والطريقة الأخرى لقياس الخرج المتوقع للطواحين الهوائية هو الإشارة إلى عدد الساعات المتاحة في السنة لإنتاج مخرج محدد من القدرة. وهذا المقياس أساسي بسبب اختلاف الهواء – فالأمر لا يقتصر على وجود فترات لا تهب فيها الرياح بل أن هناك فترات تهب فيها بقوة أكبر من المحتمل. ويجب أن توقف كل هذه الماكنات خلال فترة العواصف أو الرياح العاتية. فالماكنة غير متوفرة لإنتاج القدرة عند هبوب الرياح بشدة أو عند كونها هادئة. وعلى خلاف ذلك يقال إن الماكنة متاحة عندما تهب الرياح ضمن مدى السرع المناسبة لتوليد الطاقة ويعرف عدد الساعات خلال السنة التي يكون المحرك متاحاً فيها بالتوافرية (AVAILIBILITY) .

ويبين الشكل ج ـ 12 مناطق العالم حيث ستعطي الماكنة الهوائية الحد الأقصى لنتاج قدرتها. والأرقام الظاهرة في الدليل بدءاً بالقيم دون 750 كيلو واط/ ساعة وانتهاء بالقيم التي تربو على 5000 كيلو واط/ ساعة هي المعادل في الساعات في السنة التي تتمكن الماكنة فيها إنتاج خرج قدرتها التخمينية. وهكذا فإن أفضل أداء متوقع هو ما يربو على 5000 ساعة (ويمثل 57 في المئة من 8760 ساعة في السنة). وأسوأ أداء هو 750 ساعة (8.6 في المئة). وبغض النظر عن المقياس المستخدم فمن الواضح أن مناطق معينة في العالم فقط تعتبر واعدة قدر تعلق الأمر بتوليد الكهرباء من طاقة الرياح.

وهناك اعتبار آخر. فالمعلومات عن الرياح المعطاة أعلاه هي على أساس مناطقي واسع. غير أن سرعة الرياح في الواقع تعتمد على الأحوال الموضعية مثل تضاريس الأرض والبنايات والغطاء النباتي، لذلك فإن أداء ماكنة تعتمد الهواء يتعلق بدرجة كبيرة بموقعها.

الخبرة التشغيلية

ظهر عدد من المشاكل التشغيلية بصورة واضحة عند القيام بمظاهرات لتوربين

الهواء الحديث في نهاية السبعينيات. فقد انهارت ريش التوربين بسبب الإجهادات في سرع الرياح العالية. وكان هناك فشل بسبب الكلل في ماكنة التوربين بسبب الإجهادات المتكررة لسرعة الرياح المتذبذبة. وكان سبب العديد من هذه المشاكل محاولة بناء ماكنات كبيرة جداً قطر ريش البعض منها يصل إلى 300 قدم مركبة على أبراج ارتفاعها 350 قدماً. وقد فشلت بعض هذه الأبراج الساندة بسبب الاعوجاج والتأرجح اللذين يصاحبان الرياح العاتية من دون توقف. لذا يجب تصميم الماكنات الهوائية للعمل مع سرع ريح تصل إلى 35 ميلاً في الساعة وبنفس الوقت يجب أن تكون قادرة على تحمل أعاصير تصل سرعتها إلى 100 ميل في الساعة (في وضع الإيقاف أو تجنيب الريش).

وقام المصممون استجابة لهذه المشاكل الميكانيكية بتصميم دوارات أخف وزناً ومرتكزات تُصحِح أي اختلال في استقرارها وهيكلٍ ساند أكثر مرونةً. وبدا واضحاً للمصممين بأن مدى الإنتاج البالغ العديد من الميغاواط، كما جرى تصوره في البداية، اعتماداً على الحكمة القائلة إن الحجر الأكبر هو الأكثر اقتصاداً (انظر الفصل التاسع) ليست بالمبدأ الصحيح في هذا المضمار. لذا جرى تطوير جيل جديد من مولدات الرياح أصغر حجماً وتشمل كل مواصفات التصميم الجديدة خلال عقد الثمانينيات. وكان طول ريش هذه التوربينات يتراوح بين 15 قدماً و75 قدماً وقدرة منتجة تتراوح بين 10 كيلوواط إلى نحو 500 كيلوواط (كهرباء). وقد تحققت توافرية تربو على 95 في المئة وعوامل سعة سنوية تقارب 40 في المئة (انظر الفصل التاسع) باستخدام ماكنات السعة المتوسطة هذه. وعادة تعمل هذه الماكنات في مزارع الرياح وتستفيد من المراقبة المركزية والتحكم المتوافر في مجموعات من المولدات التي تعتمد هذه الطاقة.

لقد جرى نصب وتشغيل الجيل الثاني من المولدات التي تعتمد الرياح من قبل القطاع الخاص بمساعدة حكومية بشكل محفزات مالية بدل أن تكون جهداً تجريبياً تشرف عليه الحكومة الاتحادية بصورة كاملة. وكانت الحوافز في الأغلب تأخذ هيئة تخفيضات ضريبية، وأيضاً بشكل ضمانات تشغيل بموجب الأسس التي أوجدها قانون سياسة تنظيم شركات المنافع العامة (انظر الفصل التاسع). وقد استفاد مصنعو المحركات العاملة بالرياح من برامج البحث والتطوير الحكومية السابقة، غير أن

التصاميم الجديدة كانت قد صنعت ووضعت قيد العمل من قبل شركات قطاع خاص أميركية مثل (U.S. Wind Power). وجرى اعتماد حوافز للمولدات الهوائية وبقية أنواع الطاقة المتجددة في أوروبا في الثمانينيات أيضاً مما شجع جهود التطوير كذلك.

كانت كاليفورنيا في المقدمة في الولايات المتحدة في تطوير المولدات الهوائية. فقد أجازت حكومة الولاية سماحاً ضريبياً يبلغ 50 في المئة يضاف إلى السماح الضريبي الاتحادي (15 في المئة سماح ضريبي و10 في المئة من الاستثمار) ويمثل ذلك رزمة ضرائب تحفيزية ملائمة جداً. ومع انتهاء المحفزات الضريبية الاتحادية سنة 1985 كان الجيل الجديد من التوربينات الهوائية قد رسخ خلال الفترة 1981 – 1986 في «مزارع الرياح» في كاليفورنيا.

لقد أظهرت مزارع الرياح في كاليفورنيا، وهي عاملة الآن لأكثر من عقد من الزمن – جدوى ومنافع الأسلوب الجديد لتوليد الكهرباء من الرياح باستخدام عديد من ماكنات متوسطة الحجم بدل عدد قليل منها. ونموذج الماكنات المستخدمة في كاليفورنيا ماكنة ذات مخرج قدرة يبلغ 400 كيلوواط (كهرباء) وقطر دوار يبلغ 33 متراً. وقد وجد المشغلون أن بالإمكان الحصول على مخرجات أسلس بواسطة جمع المخرجات الكهربائية لمجموعات واسعة من هذا النوع من المحركات ذات الموثوقية العالية، إضافة إلى ذلك فالمحركات الصغيرة كماكنات مفردة أكثر موثوقية.

تحديد موقع مزرعة الرياح

كان مضيق التامونت في كاليفورنيا موقع أول مزرعة رياح ناجحة في الولايات المتحدة. فالرياح هناك ملائمة وقوية بسبب ظاهرة «نسيم البر والبحر» الذي تسببه السخونة الشمسية المتفاوتة لمنطقة اليابسة مقارنة مع البحر قرب خط الساحل. وما يعزز شدة هذا النسيم مروره في المضيق شرق خليج سان فرانسيسكو. ويبين الشكل ج ـ 12 أن أكبر توافر للرياح النشيطة يقع عادة في المناطق الساحلية (بسبب تأثير البر – البحر) أو في المناطق الجبلية، فالارتفاعات العالية ينجم عنها رياح قوية. ويتبع التوزيع الجغرافي لسرعة الرياح عبر الولايات المتحدة المبين في الشكل 2-10 هذا النمط.

والمنطقة التي ليست ساحلية ولا جبلية هي منطقة السهول العظمى في أعالي الغرب الأوسط وهي مع ذلك مركز لدراسة إقليمية واعدة للموارد الهوائية. وسرع الرياح هناك ليست عالية جداً، بل معتدلة غير أنها مستديمة وهذا ما يشجع على تطوير مزارع الرياح. فالأمر لا يقتصر على المواءمة التقنية لتطوير هذه المزارع في أعالي الغرب الأوسط، بل إنه مقبول اجتماعياً. والقبول اجتماعياً عنصر مهم في التكنولوجيات البديلة. يشمل ذلك بالنسبة إلى تطوير مزارع الرياح الاعتبارات الآتية: استخدام الأرض، الأثر المرئي، الضجيج، التداخل مع الاتصالات، وأخيراً قتل الطيور. ويلطف الموقع الريفي معظم هذه الاعتبارات حيث يميل استخدام الأرض المزدوج مع الزراعة على تخفيف الأثر عن أولئك المعرضين له.

وأكثر المساحات الواعدة هي أراضي البراري الزراعية المستوية أو المتموجة بصورة بسيطة في آيوا وآركنساس وداكوتا الجنوبية والشمالية المحتوية على مواقع رياح جيدة. ويبدو أن الاستخدام المزدوج لمزارع الرياح مع الزراعة العادية في معظم هذه المناطق – وهو أمر طبّق بنجاح في كاليفورنيا – ممكن. وسيجري تعويض مالكي الأرض عن هذا الاستخدام المزدوج مباشرة بمبلغ عن أجرة الأرض لكل آكر يستخدم من قبل المولدات الهوائية. وتربو المساحة الكلية القابلة للاستغلال لتوليد القدرة من الرياح في أعالي الغرب الأوسط حيث يكون هذا الاستغلال مقبولاً اجتماعياً فقط عن 300 ألف ميل مربع. وإذا ما استخدمت هذه المساحة لتوليد الطاقة من الرياح فبالإمكان إنتاج طاقة كهربائية تفوق المتطلبات السنوية للمنقطة ذاتها بعشرة أمثال. وقد قُدِّر أن 90 في المئة من أراضي رعي الماشية و70 في المئة من الأراضي الزراعية و50 في المئة من أراضي الغابات صالحة للاستخدام لإنتاج الطاقة من الرياح من غير المساس باستخداماتها الأصلية.

وتبقى هناك مشكلة حول قتل الطيور. فالطيور تطير عبر الريش المتحركة للتوربين وقد سبب ذلك بعض الجدل في مزارع الرياح الحالية في كاليفورنيا. ورغم أن عدد الطيور المقتولة قليلاً إلا أن ذلك قد يكون ذا أهمية بالنسبة إلى أجناس من الطيور مثل النسور. ومع ذلك فإن موت الطيور بسبب مولدات الطاقة من الرياح قليل بصورة عامة في الوقت الحاضر إذا ما قورن بأسباب أخرى.

والاعتبار الآخر لتحديد موقع مزرعة الرياح هو علاقتها مع الاستخدام المزمع، أو مع طريقة التوزيع وذلك عادة شبكة توزيع كهربائية. ولا يقتصر الأمر على قرب المزرعة من موضع الطلب (لغرض نقل القدرة)، إنما هناك مشكلة إضافية وهي احتمالية عدم توافر الكهرباء المولدة من الرياح عند اشتداد الحاجة إليها، أي في أوقات حمل الذروة. وفي حالة مزرعة الرياح في التامونت وغيره من المواقع في كاليفورنيا فإن شدة هبوب الرياح اليومية المصاحبة لشروق الشمس توفّر انسجاماً ممتازاً مع ارتفاع الطلب اليومي لدى مؤسسات الكهرباء على امتداد ساحل كاليفورنيا. وقد جرى توقع تطابق مشابه لملائمة الطلب مع المواقع في أحد مواقع الغرب الأوسط على الأقل. وعندما تبرز مثل هذه الحالة يمكن احتساب جزء أكبر من السعة الموفرة لطاقة الرياح (وهي متقطعة) مساوية للسعة التقليدية الموفرة.

من ناحية أخرى إذا ما كان التوليد من الرياح في موقع معين غير ملائم لتلبية الطلب العالي المطلوب خدمته، استوجب الأمر خزن الطاقة (مثلاً في بطاريات) لتوفير طاقة الرياح عندما تبرز الحاجة. وعلى أي حال سيبقى توليد الطاقة من الرياح محدوداً في توفير الطاقة على أسس عشوائية ما لم تطور تقنيات خزن الطاقة بكلفة معقولة وعلى مجال كبير. ومن غير الممكن الاعتماد على الرياح لتجهيز أكثر من 15 في المئة من الطلب الكهربائي الكلي (بحساب كيلوواط – ساعة من الطاقة) في أي منطقة من القطر لكونها ذات طبيعة غير مستقرة. وسينحصر دورها في مثل هذه الحالة في الحلول محل أنواع الوقود الأحفوري مرتفعة الثمن.

التغلغل في السوق

انخفضت الكلفة الاستثمارية لتوربينات توليد الطاقة من الرياح في فترة أواخر الثمانينيات مقاربة كلفة 1000 دولار للكيلوواط ويقارن ذلك بكلفة محطات القدرة التقليدية. ولما لم تكن هناك كلفة وقود في حالة التوليد من الرياح فهذا ما جعل الكلفة التنافسية للطاقة المنتجة تهبط إلى مستوى 9 سنت للكيلوواط – ساعة سنة 1994 (انظر الفصل التاسع) من غير احتساب كلف النقل والتوزيع. وأهداف الكلفة لمشجعي هذه التقنية سواء كانوا من الحكومة أو من القطاع الخاص هو خفض الكلفة الإنشائية إلى ما دون 1000 دولار لليكلوواط وكلف توليد تقل عن 5 سنت للكيلوواط – ساعة لمواقع الرياح الجيدة. ورغم المحددات الظاهرة الآن، إلا أن وزارة الطاقة في

الولايات المتحدة متفائلة حول تغلغل طاقة الرياح وتتوقع زيادة طاقة التوليد الحالية مئة ضعف مع حلول سنة 2030 حيث يتوقعون أن تعوِّض هذه الطاقة عما يقدَّر بـ 3 إلى 4 كواد من الطاقة الأولية من ميزانية الطاقة القومية (انظر الفصل الرابع).

ويبدو اختصاراً أن تكنولوجيا توليد الكهرباء من الرياح لها مستقبل واعد. وهي الأكثر احتمالاً في المستقبل القريب إلى المتوسط مقارنة بالتوليد الكهربائي من الطاقة الشمسية. فالتشغيل المنافس تقريباً للتوليد من المحطات الكبيرة قد حصل في عدة مواقع في كاليفورنيا وفي شمال أوروبا ويستمر التغلغل بالتوسع في الأسواق. وقد تحقق التشغيل الموثوق باستخدام ماكنات متوسطة الحجم تعمل في مزارع ريح واسعة. ومجموع هذه التوربينات عند جمعها بصورة شاملة يبلغ نحو 16000 توربين مفرد ذي سعة توليدية تفيض عن 1.500 ميغاواط (كهرباء) وهي تُنتج حالياً نحو 2.5 تيراواط – ساعة في الولايات المتحدة. سنوياً وقد بدأ العمل في مشاريع مهمة في أقطار العالم الثالث مثل الهند. وتربو سعة الرياح الكلية المتوافرة على مستوى العالم عن 3000 ميغاواط (كهرباء).

أنواع الوقود التركيبي المشتقة من الفحم

الوقود التركيبي هو وقود مصنّع بهيئة غازية أو سائلة يمكن أن يحل محل أنواع الوقود الأحفوري التقليدية كالغاز الطبيعي أو النفط. إن المصدرين الرئيسين للمواد الخام لهذه الأنواع البديلة من الوقود هي الفحم والكتلة الحيوية. والفحم كما رأينا في الفصل الثاني مصدر هائل للوقود الأحفوري في حين أن الكتلة الحيوية، وهي مصدر متجدد، لم تستخدم كمصدر للطاقة إلا بصورة قليلة جداً. وسنركز في هذه الجزء على أنواع الوقود المشتقة من الفحم لكوننا بحثنا في الكتلة الحيوية في الفصل الحادي عشر.

والشيء الذي يتضمنه اصطناع وقود تركيبي أساساً هو عملية تفاعل كيميائي ومعالجة حرارية والضغط أحياناً ليؤدي كل ذلك إلى مركبات كيميائية جديدة تمتلك محتوى حراري وحالة فيزيائية مشابهين للوقود الأحفوري السائل أو الغازي. وهناك طرق مختلفة لاشتقاق الوقود التركيبي بهذه الحالة من مصادر أحفورية بديلة ومن أمثل ذلك الرمال القيرية التي تحتاج إلى معالجات فيزيائية واسعة فقط إنما لا تحتاج إلى اصطناع مركبات كيميائية جديدة.

وربما يطرح سؤال منطقي. لماذا ننشغل بالخطوة التركيبية الإضافية للمعالجة التركيبية عندما يكون الفحم ذاته يستخدم كوقود؟ لماذا لا يحرق ببساطة مباشرة؟ الجواب هو أن الفحم بحالته الطبيعية غير ملائم لبعض الاستخدامات وبخاصة تلك المتعلقة بالنقل بالسيارات أو الطائرات. والوقود السائل والغازي يمتلك ميزة في الخزن وسهولة النقل لا يمتلكها الفحم.

فكِّر في وقود السيارات. فالبنزين ووقود الديزل وهما نوعا الوقود التقليدي للسيارات مشتقان من النفط. والنفط (أكان خاماً أم مشتقات مكررة) يُنقل الآن بكفاءة كبيرة بواسطة خطوط الأنابيب والناقلات البحرية وسيارات الصهريج. ويجب في أي وقود بديل سيجري استخدامه كمعوض عن المنتجات النفطية في السيارات، أن يتمتع بسهولة النقل والخزن والمداولة نفسها (هناك تفصيل أكبر عن هذا في الفصل الحادي عشر).

ويجب أن يمتلك الوقود المعوّض البديل مواصفات أخرى مكافئة. فالغاز الطبيعي مثلاً لا يمتلك خواص النقل والخزن السهل وحسب بل هو أيضاً وقود نظيف – يوفِّر الحرارة مع مستويات منخفضة من الانبعاثات الملوثة. لذا يجب أن يتمتع أي وقود يعوض عنه بخواص كيميائية مقارنة. ولكي تحصل على مثل هذا البديل يجب أن ينقى منتوج تركيبي مشتق من الفحم بصورة جيدة وهو يحوي نسبة عالية من الميثان والهيدروجين باعتبارهما المكونات القابلة للاحتراق.

ويمكن أن يكون لعملية التحويل إلى وقود تركيبي تأثيرات مرغوبة وقد برهن الكيميائيون على إمكانية تحويل الفحم إلى وقود سائل أو غازي بمعالجات فيزيائية. غير أن تطوير الوقود التركيبي ما زال في بداية الطريق قبل أن يصبح حقيقة تجارية. والحقيقة أن ما بينه مهندسو التطوير حتى الآن هو وجود وسائل متعددة لإنتاج الوقود التركيبي الغازي أو السائل. وعلينا أن نتذكر على أي حال أن أي برهان حاسم على التفوق التكنولوجي لأي من هذه الوسائل أو الطرق وعلى كونها صالحة للاستخدام التجاري لم يقدم حتى الآن.

الوقود التركيبي المشتق من الفحم

يمكن استخدام الفحم كمكوّن أساسي للغاز التركيبي أو المادة النفطية التركيبية، رغم أنه يجب أن يعالج بصورة واسعة لأي من الاستخدامين وأن يغير تركيبه الكيميائي. يتألف الفحم بصورة أساسية من عنصرين وهما الكربون والهيدروجين. ويمكن القول بصورة عامة إن الهدف العلمي الرئيس في تطوير كل أنواع الوقود التركيبي المشتق من الفحم هو لإيجاد أنواع غازية أو سائلة من المركبات الهيدروكربونية التي تمتلك نسبة أعلى من الهيدروجين إلى الكربون من النسبة الموجودة في الفحم ذاته. وسنبحث في كلتا التكنولوجيتين أي التحويل إلى غاز والتحويل إلى سائل.

تحويل الفحم إلى غاز

إن إنتاج بديل تركيبي للغاز الطبيعي عملية معقدة ومكلفة. غير أن بدء العملية على أي حال بسيط نسبياً حيث يمكن ببساطة تحويل الفحم إلى غاز بتسخينه فقط. ويمكن استحداث غاز ذي قابلية احتراق أفضل من خلال مفاعلة الفحم مع الماء والهواء بالإضافة إلى حرارة. وتوفر هذه التفاعلات أولياً نوعين من الغازات: أول أكسيد الكربون (CO) والهيدروجين (H_2). وكلا الغازين قابل للاحتراق، ويمكن استخدامه كمصدر للطاقة، وهما يعرفان باسم غاز المدينة، وهو تعبير يعود بأصوله إلى القرن التاسع عشر.

غير أن أول أكسيد الكربون أو الهيدروجين سواء كانا مفردين أو سوية لا يقارنا بالغاز الطبيعي في محتوى الطاقة. فعملية تحويل بسيطة إلى غاز التي تستخدم الحرارة والماء والهواء العادي تنتج غازاً منخفض القيمة الحرارية التي تبلغ في حدود 150 وحدة حرارية بريطانية للقدم المكعب القياس. وتحديد المحتوى الحراري ناجم عن تخفيف مزيج $H_2 + CO$ بغازات غير قابلة للاحتراق مثل النيتروجين وثاني أكسيد الكربون. وإذا ما استخدم الأكسجين النقي بدل الهواء العادي في التفاعل فسيكون منتوج غاز الفحم ذا محتوى حراري متوسط. أما الغاز الطبيعي فهو غاز ذو محتوى حراري عالٍ يبلغ نحو 1000 وحدة حرارية بريطانية للقدم المكعب القياسي، ويتألف بأغلبيته من الميثان CH_4. ورغم أن أحد منتجات عملية تحويل الفحم إلى غاز من

النوع العادي هو الميثان، إلا أن نسبته ضئيلة. ولكي يحول الفحم إلى غاز يقارن بالغاز الطبيعي، هناك حاجة إلى تفاعلات إضافية، ويحتاج في الأغلب إلى عوامل محفزة لزيادة نسبة الميثان.

وبإمكاننا الحصول على رؤية واضحة لعملية تحويل الفحم إلى غاز من خلال النظر في طريقة لورغي (انظر الشكل 15.11 عن نظام لورغي لتحويل الكتلة الحيوية إلى غاز). وتستخدم هذه الطريقة المعروفة منذ الثلاثينيات تجارياً لإنتاج الغاز، إلا أن ناتجها من نوع الغاز منخفض أو متوسط القيمة الحرارية. ومع ذلك فإن أجهزة لورغي استخدمت لإنتاج غازات من الفحم تجري معالجات إضافية لها لتحويلها إلى غاز طبيعي مصنّع (Synthetic Natural Gas or SNG)

يجري تلقيم الفحم في جهاز تحويله إلى غاز ويتعرض أثناء نشره من خلال قمة حجرة التفاعل إلى حرارة من الأسفل تعمل على تجفيفه. كذلك فإن الفحم في درجات حرارة تتراوح بين 1100^{o} – 1500^{o} ف يتسامى أيضاً، ويؤدي هذا التفاعل إلى إنتاج كميات قليلة من الغاز. وكما نرى في الجدول ج.2 فإن تفاعل التسامي هو معالجة كيميائية تنتج $H_2 + C + CH_4$. غير أن هذا ليس إلا بداية عملية التحويل إلى غاز في منظومة لورغي. وحين يسقط الفحم في المحجرة فهو لا يمر فقط بتسخيرة أوسع إنما يتفاعل مع الهواء والبخار. والهواء والبخار مع استمرار استعمال الحرارة من الفحم الذي يحترق في قعر المتغون ينجم عنه ثلاثة تفاعلات غازية مختلفة يمكن أن تحدث معاً. يسبب تفاعل الكربون – الأكسيد (انظر الجدول ج-2) من تأثير الحرارة على الكربون والأكسجين، إطلاق كل من ثاني أكسيد الكربون غير القابل للاحتراق وأول أكسيد الكربون القابل للاحتراق. ونحصل من إضافة البخار، على تفاعلي الكربون – البخار والماء – الغاز. وينتج من التفاعل الأول الهيدروجين وأول أكسيد الكربون وعن التفاعل الثاني الهيدروجين وثاني أكسيد الكربون.

وتنتج منظومة لورغي، رغم تعدد التفاعلات، غازاً ذا محتوى قليل من الميثان. ويمكن إنتاج كميات أكبر من الميثان حتى في أنواع طريقة لورغي للمعالجة من خلال تسليط الحرارة والضغط العالي. يؤدي هذا إلى تفاعل الكربون وغاز الهيدروجين المدعو (التحويل إلى غاز بالهدرجة) أو عملية التحويل إلى ميثان (انظر الجدول ج ـ 2).

الجدول ج ـ 2 تفاعلات تحويل الفحم إلى غاز.

التفاعل الكيميائي	اسم التفاعل	المكون ودرجته
1100° – 1500° ف فحم $\longrightarrow CH_4 + C + H_2$	التسامي	كافة
$C + O_2 \longrightarrow CO_2$ $2C + O_2 \longrightarrow 2CO$	كربون – أكسيد متوسط	المحتوى الحراري متوسط
$C + 2H_2 \longleftrightarrow CH_4$	التحول الهيدروجيني إلى غاز أو ميثان	واطئ أو متوسط المحتوى الحراري
$C + H_2O \longleftrightarrow CO + H_2$	كربون – بخار	واطئ أو متوسط المحتوى الحراري
$CO + H_2O \longleftrightarrow CO_2 + H_2$	إزاحة الماء – الغاز	واطئ أو متوسط المحتوى الحراري
$3H_2O + CO \longleftrightarrow CH_4 + H_2O$	التحول المحفز إلى ميثان	غاز عالي المحتوى الحراري

المصدر: U.S. Department of Energy, 1981.

وللحصول على غاز طبيعي تركيبي يجب تنقية الغازات واطئة ومتوسطة المحتوى الحراري لعملية لورغي (أو عمليات مشابهة) ثم تعريضها إلى تفاعلات إضافية. والمطلوب عادة الخطوة الأخيرة المدرجة في الجدول ج.2 التي تحول إلى ميثان بواسطة عامل محفز. والمسألة المهمة في هذا التفاعل ليس كمية الميثان في الغاز، بل نسبة الهيدروجين إلى أول أكسيد الكربون. ويجب أن تكون هناك نسبة ثلاث جزيئات هيدروجين أو أكثر لكل جزيئة CO (أو أن $H_2/CO > 3$). وإذا كانت النسبة تقل عن ثلاث فيجب أن يخضع الغاز إلى إجراء آخر قبل التحول الميثاني المحفز، وهو ما يدعى تحول إزاحة المحفّز الذي يتفاعل فيه أول أكسيد الكربون مع البخار تحت تأثير عامل محفز لرفع نسبة الهيدروجين (والعوامل المحفزة هي مواد تعزز التفاعلات الكيميائية من غير أن تدخل في المركبات التي تنتج).

وكانت أولى منشآت تحويل الفحم إلى غاز قد بنيت لأول مرة في بدايات القرن التاسع عشر واستخدمت بكثافة في الصناعة في الجزء الأخير من ذلك القرن. وكانت المنتجات بصورة عامة غاز واطئ المحتوى الحراري استخدم للتسخين الصناعي وللإنارة البيتية قبل حلول عصر الكهرباء. وجرى تطوير تفاعل الماء ـ الغاز في أواخر القرن التاسع عشر، ونتج منه غاز جيد ذو محتوى حراري متوسط.

وقد أهمل إنتاج الغاز التركيبي تقريباً في الولايات المتحدة عندما توافر الغاز الطبيعي بصورة واسعة بُعيد الحرب العالمية الثانية. فاستخراج الغاز الطبيعي لا يكلف إلا جزءاً فقط من كلفة تركيب وقود غازي، كما وفّر بناء خطوط الأنابيب للمسافات البعيدة وسيلة نقل قليلة الكلفة من آبار الغاز إلى مراكز الطلب وتوقفت نتيجة ذلك عمليات تطوير طرق معالجة جديدة لتصنيع الغاز التركيبي. غير أن الاهتمام في التطوير انتعش مع حلول أزمة الطاقة في السبعينيات. عند ذلك قامت الحكومة والشركات الخاصة سوية أو بصورة منفصلة بتقييم طرق معالجة مختلفة. ورغم أنه لم يكن ممكناً القول إن أي طريقة كانت مهيئة للتطوير التجاري الواسع، إلا أن التخطيط جرى لمشاريع رائدة على مفاهيم واعدة بدرجة أفضل كما جرى إنشاء بعض منها.

وتحتاج النماذج الأولى إلى سنين من الخبرة التشغيلية لتطوير الإمكانات التكنولوجية ولمواجهة العديد من أوجه إنتاج الغاز التركيبي. ولن يقتصر الأمر على قيام المهندسين بإيجاد إجابات للاستفهامات المتعلقة مباشرة بإنتاج الغاز، بل إن عليهم أيضاً بيان إمكانية قيام المنشآت بمعالجة كميات هائلة من الفحم وإذا ما كان بالإمكان مناولة الفضلات بطريقة سليمة بيئياً.

تسييل الفحم

من الممكن أيضاً تسييل الفحم لإنتاج بدائل للنفط الخام . وتتضمن إحدى الطرق البدء بالغاز وتعديل تركيبة الغاز للحصول على النسبة المطلوبة من الهيدروجين إلى الكربون ومن ثم تنقيته ومفاعلته بعد ذلك في معالجة خاصة لتحويله إلى سائل. ولما كانت هذه الطريقة تبدأ بالغاز فهي تدعى بالتسييل غير المباشر.

وهناك طريقة معالجة واحدة للتسييل غير المباشر تنتج الآن كميات لا بأس بها من الوقود التركيبي. ففي أفريقيا الجنوبية يجري إنتاج 50000 برميل في اليوم من الوقود التركيبي وتسويقه ولو أن هناك دعماً سعرياً كبيراً. وهو ينتج في ثلاث منشآت تستخدم طريقة مشابهة غير مباشرة تدعى طريقة SASOL. وتبدأ هذه الطريقة مع خطة لورغي للتحويل إلى غاز. وما إن يُنظَّف وينقَّى الغاز حتى تجري معالجته بطريقة تدعى اصطناع فيشر– تروبش (Fischer-Tropsch Synthesis). ويجري تفاعل الغاز في هذه الطريقة التي طورت سنة 1925 تحت ضغط يبلغ 300 باوند على الإنش المربع بوجود

عامل محفز حديدي، ويطلق هذا التفاعل حرارة ومع إزالة الحرارة بواسطة مواد التبريد تتسيل الهيدروكربونات الغازية. ويحوي منتوج إصطناع فيشر تروبش معظم منتجات النفط الخام العادية بدءاً بالمنتجات الخفيفة ووصولاً إلى المنتجات الثقيلة.

ورغم أن منشآت ساسول قد عرضت بنجاح التشغيل الكبير الحجم نسبياً للتسييل غير المباشر إلا أن هذه الطريقة غير كفوءة نسبياً، لذا يعتقد أنها ستبرهن في النهاية على أنها أكثر كلفة من الطريقة المباشرة للتسييل. والهدف الكيميائي الأساسي في التسييل المباشر هو ذاته كما في التسييل غير المباشر وفي التحويل الصرف إلى غاز: أي الحصول على نسبة هيدروجين إلى كربون أعلى مما يوجد طبيعياً في الفحم. غير أن البنية الجزيئية للفحم في عملية التحويل إلى غاز (وكذلك في التسييل غير المباشر) تكسّر إلى مكونات صغيرة. ويتطلب التسييل المباشر أن تكسر البنية الجزيئية الكبيرة للفحم أيضاً. هذه العملية التي تدعى عملية التكسير (Cracking Process) تتطلب درجة حرارة تصل إلى 900 درجة فهرنهايت وضغط يصل إلى 10000 باوند على الإنش المربع. وما إن يجري تكسير الفحم فسيكون بالإمكان هدرجته مباشرة بالهيدروجين المضغوط أو من خلال مذيبات مضّيفة تقوم بنقل هيدروجينها إلى المركبات الناتجة في المحلول.

وهناك أساساً ثلاث تقنيات للتسييل المباشر: التحلل الحراري (Pyrolysis) والاستخلاص بالمذيب والهدرجة بالعامل المحفز. وتعتبر طريقة التحلل الحراري المعروفة منذ القرن التاسع عشر أبسطها لأنها تقتصر على التعامل مع الفحم في درجات حرارية عالية في جو يفتقر إلى الأوكسجين. وينتج من عملية التحلل الحراري مخرجات غازية وسائلة ونفاية صلبة قليلة الهيدروجين تدعى المتفحم (Char). ولا تعتبر الطريقة واعدة للعمليات واسعة النطاق بسبب الحاجة لفصل المتفحم عن الهيدروكربونات السائلة, ثم التخلص منها. وستنتج العملية الواسعة كميات هائلة من المتفحم.

أما عملية الاستخلاص بالمذيب فهي واعدة بصورة أكبر، وقد جرى تطوير أنواع مختلفة من عمليات الاستخلاص بالمذيب. ويجري أساساً في جميع هذه العمليات مزج الفحم مع مادة تذيبه. واختلاف الطرق يكمن على وجه الدقة في أسلوب إنجاز الهدرجة.

والتسييل بالعامل المحفز رغم كونه في مرحلة تجريبية مبكرة مقارنة بالطريقة السابقة كان الهدف منه منذ البدء الحصول على غلّة أكبر من السوائل. ويجري في أحد الأمثلة تسخين ما يدعى (H-coal) وهو ملاط ممزوج من الفحم وسائل مذيب يجري تسخينه ثانية تحت ضغط عالٍ ويمزج مع غاز الهيدروجين. غير أن مذيب الفحم تجري مفاعلته أيضاً مع عامل محفز.

مخاوف بيئية

إن واحداً من أهم المشاكل التي تؤثر، في النهاية، في جدوى الوقود التركيبي المشتق من الفحم عموماً هو الأثر الذي سيتركه على الصحة والبيئة. ومن الممكن أن يكون لأنواع الوقود المشتقة من الفحم تأثير عميق في كليهما بدءاً بعملية الاستخراج وانتهاء بالاستعمال. ويتوقع في الحقيقة أن يكون لصناعة وقود تركيبي واسعة النتائج البيئية نفسها التي تسببها الصناعات التي تستخدم الفحم الآن كمصدر للطاقة. إضافة إلى ذلك ستكون هناك مشاكل عادة ما نجدها في صناعة التكرير وفي الحرق التقليدي للوقود السائل والغازي. ويمكن في النهاية أن يكون لهذه الأنواع من الوقود مشاكل خاصة بها.

تستخدم الحرارة على سبيل المثال خلال عملية إنتاج الوقود التركيبي إما بشكل بخار أو مباشرةً كما تتطلب تفاعلات المعالجة. وتزود الطاقة الحرارية بواسطة حرق الفحم ذاته، والحقيقة أن كميات السعرات الحرارية في الفحم الذي يستخدم هي أكثر مما نحصل عليه في الغاز أو السائل. هناك باستخدام الطرق الحالية حاجة إلى نحو 3 وحدات حرارية بريطانية من معادل الفحم للحصول على 2 وحدة حرارية من الغاز. نتيجة لذلك ستتطلب منشأة إنتاج الوقود التركيبي مثل محطة القدرة الكهربائية تحكماً على منبعثات أكاسيد الكبريت والنيتروجين وكذلك على الجسيمات. والحقيقة أن وكالات حكومية مختلفة ونقابات للعمال ومجموعات بيئية عبرت عن مخاوفها بخصوص الضرر الكامن الذي يمكن أن يؤثر في نوعية الهواء من تشغيل منشآت الوقود التركيبي وذلك في فترة الدفع باتجاه تطوير هذه التكنولوجيا في حدود سنة 1980.

ولا تنتهي المخاوف البيئية مع تلوث الهواء كما هي الحالة مع محطات القدرة

الكهربائية التي تستخدم الفحم. فرماد الفحم يجب التخلص منه أيضاً. ورغم أن الرماد لا يشكل 10 في المئة من كتلة الفحم الأصلية إلا أن منشآت الوقود التركيبي الكبيرة تستخدم كميات هائلة من الفحم . وإذا ما أوفت الولايات المتحدة بثلث احتياجاتها من الغاز الطبيعي بواسطة الغاز التركيبي، فهذا يعني أن صناعة الغاز التركيبي ستستهلك ما يربو على 2 مليار طن من الفحم قليل الكبريت من الولايات الغربية سنوياً. ويشكل هذا حاجة تفوق بدرجة مرتبية أعلى الوتيرة المتوقعة لاستخراج الفحم للأغراض التقليدية. وهذا يعني أولاً أن كميات هائلة من الرماد إضافة إلى أوحال الغاسلات ورواسب إزالة الكبريت ستنتج وستحتاج إلى أساليب سليمة للتخلص منها. وستسبب هذه النفايات إذا ما أُسِيء تناولها تلوثاً على مجال واسع للأنهار ومكامن المياه الجوفية.

إن تأثير مثل هذه الإنسكابات وتلك التي تنتجها عادة صناعة تكرير النفط والغاز قابل للتقييم على الأقل، وهناك تكنولوجيا للتعامل معها. أما الأنواع الأخرى فإمكانية التوقع بها أضعف، وربما تتواجد على نطاق يتطلب جهوداً هندسية كبرى لإيجاد حلول لها. وهناك في حالة التحويل إلى غاز وفي التسييل غير المباشر خوف من الآثار البيئية للغازات الحامضية، وهي أساساً كبريتيد الهيدروجين وسيانيد الهيدروجين ونفتا. وهذه الغازات ذات خطورة خاصة، ويمكن أن تكون في تراكيزها العالية قاتلة كما يمكن أن تكون عند التعرض لمستويات قليلة منها بصورة مستمرة مسرطنة– وهي خطورة قائمة خاصة للعاملين في صناعة الغاز التركيبي. ويتوقع أن ينتج من المنشآت التي تشيّد لغرض الإنتاج التجاري كميات كبيرة من الغازات الحامضية التي يجب إزالتها في مرحلة تنقية الغاز. ويتطلب التحكم بمثل هذه الأخطار تصاميم خاصة للأنظمة الفيزيائية وستكون هناك حاجة لإجراءات الصحة الصناعية لمواجهة أوضاع صناعة وقود تركيبي ناشئة.

ويجب في النهاية أن لا يغيب عن الذهن أن ثاني أكسيد الكربون هو المنتوج الذي لا يمكن تجنبه لأي نوع من الاحتراق وأن تحويل هيدروكربونات الفحم إلى أنواع أخرى من الوقود لا يبدل المنتوج النهائي للاحتراق. لذا فإن الوقود التركيبي المشتق من الفحم لن يوفِّر أي حل لمعضلة البيت الزجاجي التي جرى بحثها في الفصل السادس. والحقيقة أن استخدامها الواسع إذا ما أدى إلى توسيع وتمديد استخدام الوقود الأحفوري فيمكن أن يجعل المعضلة أسوأ مما هي عليه الآن.

نفط السجّيل

يمثل نفط السجّيل مصدراً طبيعياً للطاقة يقارن بالنفط أو ربما يفوقه. وهو يستخرج من صخر من النوع الرسوبي يعرف بحجر المارل المتصلد أو السجّيل النفطي ويوجد متمركزاً في تشكيلات جيولوجية خاصة تتواجد في كافة القارات في العالم. وأكبر التشكيلات في الولايات المتحدة توجد في يوتا ووايومنغ وكولورادو غير أن تشكيلات أصغر توجد في الولايات الشرقية أيضاً.

والنفط محصور في الصخر بشكل يدعى كيروجين وهي مادة عضوية صلبة غير قابلة للذوبان بصورة عامة. والكيروجين سلسلة طويلة معقدة يمكن كسرها مثل بقية المركبات العضوية بواسطة عملية التكسير (Cracking). والتكسير في مثل هذه الحالة يعني تعريض السجّيل المطحون إلى درجة حرارة تتراوح بين 800 إلى 1000 درجة فهرنهايت. وينتج من هذه المعالجة بخار دهني يتكثف بعد ذلك إلى ما يدعى بنفط السجّيل لتجري تنقيته بعد ذلك من خلال إزالة الكبريت والنيتروجين. ونفط السجّيل الخام أكثر لزوجة من النفط الخام لذا فهو يمثل بعض المشاكل في الشحن ستبقى قائمة لحين استحداث تقنيات تكرير تعطي منتوجاً نفطياً أكثر شبهاً بالنفط ذي النوعية الجيدة.

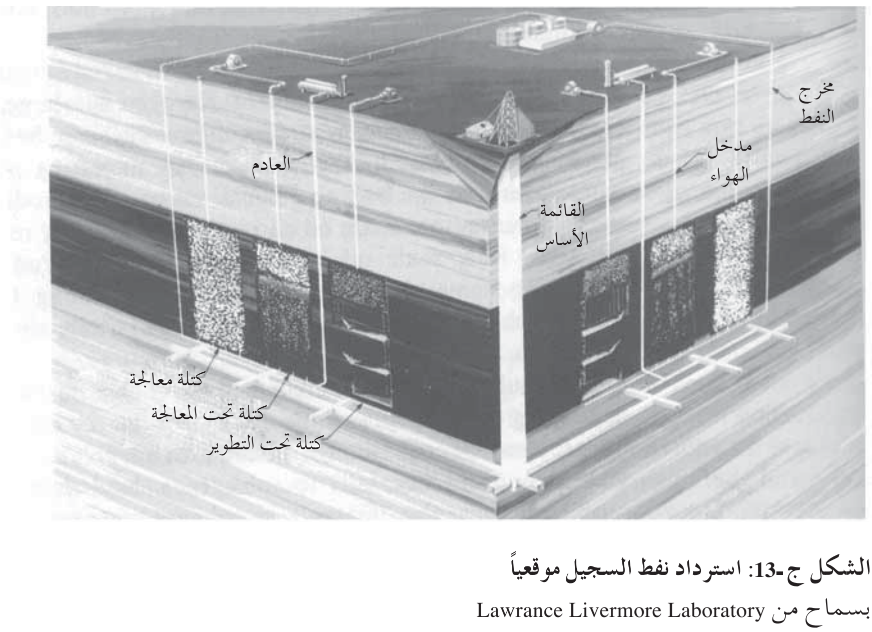
ويجري استخراج ترسبات السجّيل مثل الفحم من تحت الأرض أو بالتعدين السطحي اعتماداً على عمق الترسبات. وتنطبق نفس تقنيات استخراج الفحم ومشاكله (انظر الفصل السادس) على السجّيل أيضاً. فعمليات الاستخراج الواسعة يمكن أن تؤدي إلى تدهور نوعية الأرض وتغوّرها وإلى مشاكل أخرى. ويولِّد السجّيل كميات كبيرة أيضاً من مخلفات يجب التخلص منها. ويمكن في تشكيل ذي نوعية جيدة استخلاص نحو 25 غالوناً من نفط السجّيل من طن واحد من حجر المارل. وتكون نسبة 85 في المئة من حجر المارل من الفضلات. والسجّيل الذي جرى استخدامه أقل كثافة بسبب طحنه وهذا معناه أن حجم المادة الواجب التخلص منها أكبر من المادة الأصلية بنحو 30 في المئة. نتيجة ذلك يمثل التخلص من السجّيل المستنفد مشكلة تفوق مشكلة الفحم.

يجب بعد استخراج السجّيل طحنه ومن ثم تلقيمه إلى فرن تقطير لغرض التكسير.

ويجري في فرن التقطير تسخين السجّيل المطحون بوسائل مباشرة أو غير مباشرة. ويجري استخلاص نحو 75 في المئة من الكيروجين بين درجتي حرارة 800 إلى 1000 في المنشآت الريادية.

ويمكن بدل ذلك إجراء التكسير موقعياً. يجري أولاً تفتيت السجّيل بواسطة متفجرات أو بواسطة السفع الهيدروليكي عالي الضغط. ويجري بعد ذلك إيقاد المنطقة التي تم تفتيتها في الصخر باستخدام غاز قابل للاحتراق وبالاحتراق الجزئي للسجيل ويحافظ على الإحتراق بضخ الهواء المضغوط. بعد ذلك يستخلص نفط السجّيل الخام وحده من دون المساس بالصخر. وتكون هذه التقنية صالحة عندما يكون نحو 30 في المئة من الصخر قد أزيل بواسطة التفتيت مكوناً فسحة هوائية. ويبين الشكل ج - 13 تصوراً لمقطع عرضي للاستخراج الموقعي. وتبلغ نسبة الكيروجين المستخلص بالطريقة الموقعية نحو 30 في المئة فقط.

طريقة الاستخراج والمعالجة
الموقعية لنفط السجّيل



الشكل ج-13: استرداد نفط السجيل موقعياً

بسماح من Lawrance Livermore Laboratory

تتميز طريقة الاستخلاص الموقعي بأنها تقضي على متطلبات التخلص من فضلات السجّيل وهي بخلاف طريقة الأفران لا تولد أي تلوث للهواء. غير أن الأثر البيئي

مازال موجوداً. وأحد المخاوف الرئيسة يتمثل في تلوث المكامن المائية تحت الأرض وهي مشكلة بالغة الأهمية في الولايات الغربية شحيحة الموارد المائية. وتتطلب معالجة السجّيل ذاتها كميات كبيرة من الماء تصل إلى ما يقارب 0.2 مليون آكر قدم سنوياً لإنتاج مليون برميل في اليوم من نفط السجّيل. (والآكر قدم من الماء هو الحجم المطلوب لملء حوض مساحته آكر واحد بعمق قدم واحد). ويمكن أن يفرض مشروع لاستخلاص عدة ملايين برميل في اليوم من نفط السجّيل أعباء على مصادر الماء في الغرب القاحل بدرجة لا يمكن تحملها.

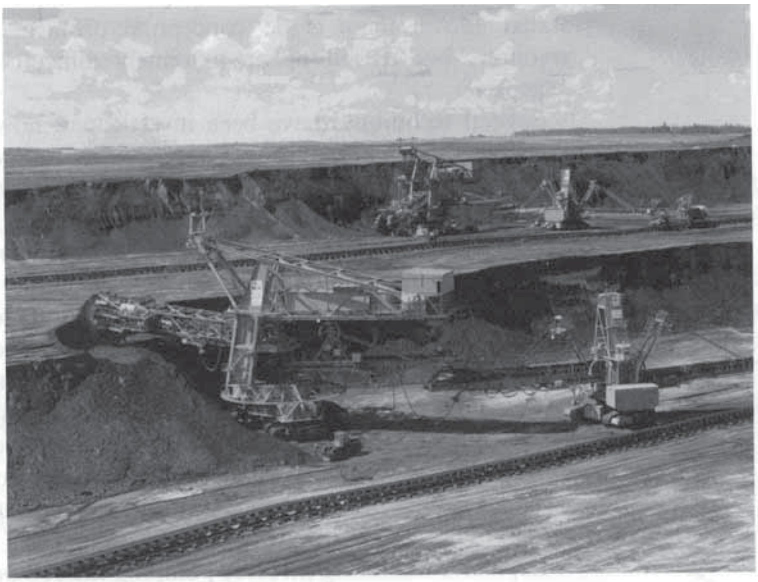
مصادرالوقود الإحفوري غير التقليدية

الرمال القيرية

الرمال القيرية هي أحواض طبيعية من الرمل والماء والقير. والقير هو نوع من الهيدروكربونات شبيه بالقطران يمكن فصله عن الرمل بطرق غير كيميائية لينتج منه ما يعادل النفط الخام.

وتتطلب أكبر عملية رمال قيرية جارية الآن وهي رمال أثاباسكا في ألبيرتا بكندا استخراج مئات آلاف أطنان الرمال كل يوم باستخدام حفارات عملاقة وأحزمة ناقلة (انظر الشكل ج.14). ويتألف الرمل شديد الكشط من حُبيبات الكوارتز في معظمه مما يؤدي إلى تآكل أجزاء المجرفة بسعة تزيد على ضعفي سرعة تآكلها في الاستخدامات الاعتيادية. ويحتوي الرمل القيري الجيد على نحو 10 في المئة من القير وزناً. ولكي يستخلص برميل واحد من نفط الرمال القيرية يتطلب الأمر استخراج نحو خمسة أطنان من الرمل القيري.

وتتألف معالجة الرمل القيري أساساً من تسخين وغربلة وتعويم القير لفصله عن حُبيبات الرمل. ويجري بعد فصل القير تحسين نوعيته في معالجة تُشابه إلى حد بعيد عملية تكرير النفط الخام. ويتضمن التحسين كذلك تنقية المنتوج واستحداث هيدروكربونات مفيدة مثل البيوتان والنفثا والكيروسين. وينصب الاهتمام في عملية التنقية أولاً على إزالة الكبريت الذي يؤلف عادة نحو 4 في المئة من المنتوج وزناً (وهو مستوى يعتبر عالياً بدرجة غير مقبولة في صناعة النفط).



الشكل ج-14 استخراج الرمل القيري في أحد ترسبات أثاباسكا بكندا.
بسماح من مكتب العلاقات العامة في البيرتا.

وترسبات الرمال القيرية كما نوّهنا في موضع آخر، هائلة الحجم على المستوى العالمي. إلا أن كلفة استغلالها عالية جداً. وكان رأس المال الأولي المستثمر في منشآت أثاباسكا يبلغ 2.5 مليار دولار ارتفع لاحقاً ليصل إلى 3.5 مليار في أواسط الثمانينيات. وكان من المتوقع في الوقت ذاته أن تبلغ كلفة الإنتاج نحو 9.5 دولار للبرميل الواحد وهي كلفة كانت تنافسية مع أسعار النفط العالمية في الثمانينيات. ومع ذلك فقد برهنت الأسعار في ما بعد على أنها أعلى مما جعل الإنتاج بالكاد تنافسياً مع النفط. وكما رأينا بالنسبة إلى بقية انواع الوقود الأحفوري غير التقليدية فقد أدت تذبذبات السوق النفطية إلى تغير التصورات حول تنافسية الرمال القيرية تجارياً.

الغاز الطبيعي غير التقليدي

لا توجد مشاكل بالنسبة إلى مشاكل المعلومات الأساسية في استخراج الرمال القيرية الشبيهة بالغاز بسبب نقص المعلومات الأساسية التصورية. إلا أن المطلوب هو إثبات أن كلفة الاستخراج تنافسية مع أنواع الوقود التقليدية قبل أن يمكن القول إن

المصادر غير التقليدية للغاز ذات جدوى.

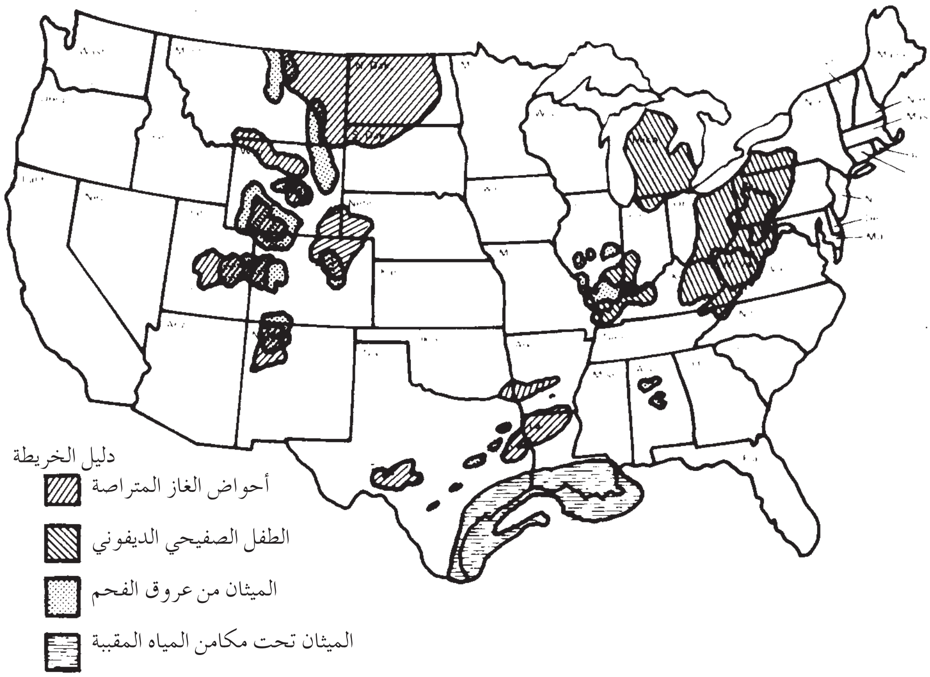
وللغاز غير التقليدي الأصول الجيولوجية نفسها لأنواع الوقود الأحفوري الأخرى، بما فيها الغاز الطبيعي التقليدي، إلا أنه ببساطة أصعب منالاً واستخراجاً. ومعظمه ببساطة غاز طبيعي كامن في طبقات جيولوجية ذات طبيعة كتيمة بصورة شديدة، لذلك لا يتدفق بسرعة كافية باستخدام طرق الحفر والضخ العادية المستخدمة مع الغاز الطبيعي. وتوجد أمثلة من هذه الترسبات الكتيمة في تشكيلات الطفل الصفيحي من العصر الديفوني في الولايات الشرقية، وفي ترسبات الرمال المرصوصّة العميقة في الولايات الغربية (انظر الشكل ج ـ 15)، وأيضاً في الميثان المنطمر في ترسبات الفحم.

والمصدر الحدسي الآخر هو الميثان الذي يعتقد أنه محصور تحت مكامن مائية عميقة في المناطق القريبة من خليج المكسيك (انظر الشكل ج ـ 15) والمدعوة القباب الجيولوجية المضغوطة. وهذه الترسبات تتواجد على أعماق سحيقة تتراوح بين 10000 و30000 قدم وتحت ضغوط كبيرة جداً تتراوح بين 2000 و5000 باوند على الإنش المربع وذلك بسبب التشكيلات الجيولوجية المقببة فوقها وفي درجات حرارية مرتفعة تتراوح بين 300° و500° ف. وهذه الوضعيات تصور الحالة القصوى لما ذكر أعلاه، ولا يوجد أي عائق يمكن تصوره يمنع استخراج هذا المورد، غير أن المهمه ستكون صعبة هندسياً ومكلفة.

وقد جرى استقصاء بضع تقنيات على أي حال لاستثمار التشكيلات الكتيمة وترسبات طفل العصر الديفوني. ويشمل هذا التفتيت الهيدروليكي والتفتيت بالتفجير، وكلتا الطريقتين مصممة لتوسيع الشقوق في الرمل أو الطفل لتتيح تدفق الغاز إلى ثقب البئر. ويمكن أيضاً تعزيز التدفق باستخدام الغاز المضغوط أو المستحلبات بعد عملية التكسير.

ويتم في طريقة التكسير الهيدروليكي ضخ سائل تحت ضغط عالٍ في الطبقات تحت الأرض من بئر محفور على السطح. وتستخدم أحد التقنيات المتقدمة المعروفة باسم التكسير الهيدروليكي الشديد (Massive Hydraulic Fracturing) أو (MHF) مئات آلاف الغالونات من سائل التكسير بضغوط بحدود 15000 باوند على الإنش

المربع. وبعد أن يكون السائل عالي الضغط قد أحدث تشققات خلال الطبقة يجري إسناد الطبقة المتشققة بحقن عوامل تساعد على التحول الهلامي وذلك للسماح للغاز بالاستمرار بالتدفق خلال التشققات إلى البئر الذي يجري الاستخراج منه.



المصدر	الغاز الموجود (10^9 ft^3)	الغاز الممكن استخراجه تقنياً (10^9 ft^3)
الرمال الغربية المتراصة	1100 – 400	320 – 50
الطفل الصفيحي في الشرق	900 – 300	520 – 10
الميثان المحتبس في عروق الفحم	700 – 300	500 – 16
الميثان في طبقات صخرية مائية جيومضغوطة	59000 – 1000	2000 – 150

الشكل ج ـ 15: مصادر الغاز غير التقليدية في الولايات المتحدة

المصدر: US. Department of Energy (1981)

ويتضمن التفتيت بالتفجير ضخ مكونات ملاط ممزوج من المتفجرات في طبقة الرمل أو الطفل. ويدفع هذا المزيج تحت ضغط إلى الشقوق الموجودة ليخترق عميقاً في العرق الحاوي للغاز. ويمكن بعد ذلك تفجير حجم المادة المتفجرة الكلي بحيث يمتد أثر المنطقة المتفتتة أكثر من عشرة آلاف قدم من ثقب البئر.

وتحتاج تقنيات استخراج الغاز غير التقليدي على وجه العموم تطويراً أكثر قبل أن تكون ذات جدوى تقنية واقتصادية. وقد حدث تقدم على الجدوى التقنية على الرمال المتراصة مثلما حدث أيضاً في إزالة الغاز من الأحواض الفحمية. غير أن الجدوى الهندسية للاستخلاص من خلال الآبار العميقة من القبب المعرضة للضغط الجيولوجي لم تصل إلى درجة تطبيق عملي.

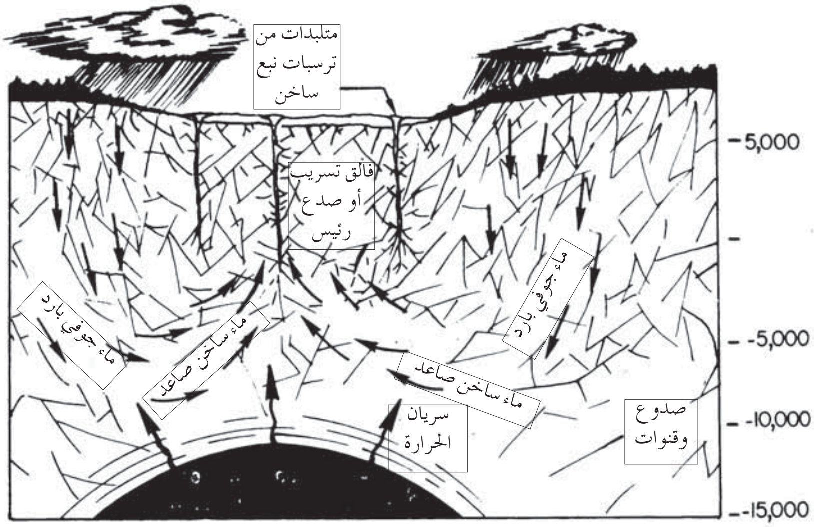
ويجب أن تكون كلفة الاستخراج (بما في ذلك الاكتشاف والكلفة الرأسمالية وكلف التشغيل) أقل من أربعة دولارات للقدم المكعب الواحد قبل أن يقترب الغاز غير التقليدي إلى الجدوى الاقتصادية ويصبح منافساً للغاز التقليدي والنفط.

الطاقة الجيو- حرارية

إن قلب كرة الأرض ليس إلا مستودعاً حرارياً هائلاً لا يمكن استنفاده عملياً. ورغم ذلك لم يجرِ إلا استغلال جزء ضئيل جداً فقط من هذه الطاقة الجيولوجية الحرارية. والاستخدام الرئيس لهذ الطاقة كان في استغلالها في التقنيات المائية – الحرارية التي تستفيد من الماء الذي يجري تسخينه في التشكيلات الصخرية العميقة في قشرة الأرض. وهذه التشكيلات تقع فوق طبقة الماغما المنصهرة رأساً على عمق آلاف الأقدام في باطن الأرض.

ويمثل الشكل ج ـ 16 خزاناً جيو حرارياً نموذجياً. ونتمكن في الشكل متابعة مسلك الماء الذي أصله ماء مطر تسرب إلى الأسفل خلال شقوق في الصخر حتى وصل إلى الأعماق حيث اكتسب الحرارة من الماغما. وما إن يسخن الماء حتى يرتفع بواسطة الحمل الطبيعي. غير أن المسلك غالباً ما تعترضه صخور كتيمة أو قليلة النفاذ فتحتجزه في خزان في باطن الأرض على عمق آلاف الأقدام. وتتزايد الحرارة والضغط في الخزان المائي الحراري بسبب التسخين والاحتباس.

وعادة ما تتجاوز الحرارة 200 درجة مئوية ويصل الضغط إلى 100 باوند على الإنش المربع (نحو سبعة أضعاف الضغط الجوي). واعتماداً على الضغط والحرارة يمكن أن يتحول الماء إلى بخار نقي أو أن يصبح مزيجاً رطباً من الماء والبخار. ويمكن تحويل البخار أو الماء الساخن للمكمن الهيدروثيرمي إلى السطح من خلال شقوق طبيعية فقط في الصخور التي فوق الخزان أو بواسطة قنوات خاصة حفرت لهذا الغرض (انظر الشكل ج.16). والشقوق الطبيعية هي مواقع الينابيع الساخنة.

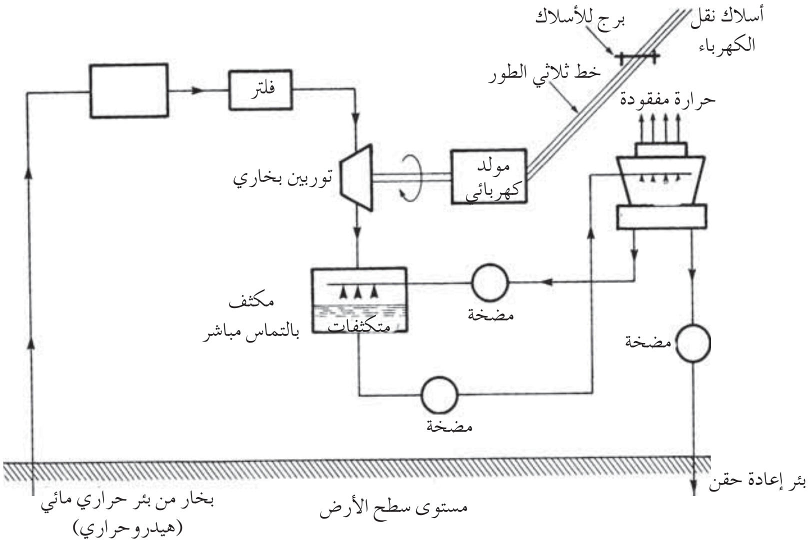


الشكل ج.16 بنية خزان مائي – حراري.

المصدر: US. Geological Survey, 1973, Geothermal Resources. Printing Office, Washington DC. US. Government

إن تحديد مواقع حفر الآبار هي عملية استكشافية شبيهة بعملية استكشاف النفط والغاز الطبيعي. وهناك تشكيلات جيولوجية خاصة فقط تعتبر مواقع ملائمة. وعندما يعثر على بئر ناجحة ففي الإمكان تجهيز بخار لمحطة كهرباء حرارية بدلاً من المرجل الموجود في محطة تعتمد الوقود الأحفوري. وفي حالة البئر التي تنتج بخاراً جافاً يمكن أن يكون للنظام الحراري مساهمة مباشرة بالبخار (الشكل ج -17) الذي لا يحتاج إلا إلى المرور خلال فاصل ومرشح قبل أن يدخل التوربين البخاري. وتمتلك المحطة الجيوحرارية العادية كفاءة تبلغ نحو 20 في المئة مقارنة بنحو 35 في المئة

للمحطة التقليدية. هذا وحده لن يكون عاملاً حاسماً في حيوية هذه التكنولوجيا لأن هذه المنشآت تعمل على أساس وقود مجاني ما إن يكتشف موقع البئر ويحفر بنجاح.



الشكل ج-17: محطة قدرة كهربائية هيدروحرارية - من نوع البخار الجاف المباشر

مقتبسة من: DiPippo, 1980, Geothermal Energy as a Source of Electricity, A World Wide Survey, for the US. Dept of Energy. US. Government Printing Office,Washington DC.

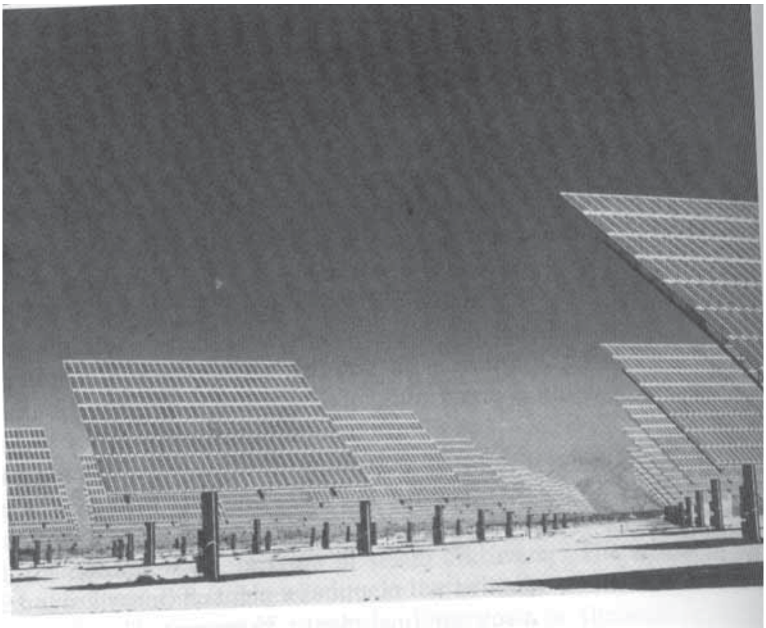
إلا أن الطاقة الجيوحرارية ليست من دون إشكالات كامنة. فالبخار والماء مثلاً غالباً ما يحويان أملاحاً ومعادن تؤدي إلى صدأ شفرات التوربين أو تنقرها. وهناك حاجة لتطويرات إضافية في المعادن المقاومة للصدأ لتقليل إمكانية العطل والاستبدال نتيجة هذه التكنولوجيا. والعائق الرئيس في طريق الطاقة الجيوحرارية هو المجال المحدود للمصدر. والمواقع التي تتمتع بأكبر إمكانية توليد تقع في أميركا الوسطى وإيطاليا ونيوزيلندا والفيلبين وغربي الولايات المتحدة. غير أنه من المتوقع بقاء السعة الكلية على المستوى العالمي صغيرة، والسعة الكلية المستغلة الآن تبلغ 6000 ميغاواط.

التحويل الشمسي المباشر

إن التحويل المباشر لنور الشمس إلى كهرباء إمكانية تكنولوجية شديدة الجاذبية. فهي مثل الطاقة الشمسية الحرارية خالية من التلوث وتستخدم طاقة الشمس المتجددة. وستلغي أيضاً كل العمليات الوسطية المتمثلة في توليد الحرارة الضرورية، إذا ما جمعت الطاقة الشمسية أولاً بهيئة حرارة. يمكن أن يحدث التحويل المباشر من خلال عدة آليات فيزيائية مختلفة بما فيها المعالجات الضوئية – الكيميائية أو التأثير الحراري الكهربائي والتأثير الضوئي الفولتائي. وقد نال التأثير الضوئي الفولتائي من بين هذه الخيارات أكبر قدر من العناية والتطوير. وقد جرى اكتشاف هذا التأثير من قبل أ. س. بيكريل (A. C. Bequerel) سنة 1839 غير أنه لم يضع موضع استخدام مفيد حتى خمسينيات القرن العشرين عندما استخدم لأول مرة في برنامج الفضاء. والتحويل الضوئي الفولتائي اليوم، تكنولوجيا فاعلة غير أن العائق الوحيد لاستخدامها بشكل واسع هو كلفتها كما لاحظنا في الفصل العاشر.

وخلايا التحويل الضوئي الفولتائي أشباه موصلات من نوع العدد الوصلية. وهي قادرة على تزويد قدرة كهربائية من النوع المستمر (D.C.) عندما تشرق عليها الشمس محولة الطاقة الشمسية الساقطة عليها مباشرة بكفاءة تصل إلى الحد النظري البالغ 30 في المئة (وهذه تقابل حدود كفاءة كارنو للتحويل الحراري). ويبين الشكل ج - 18 صفوفاً من الخلايا الضوئية الفولتائية العاملة. وكل خلية في الصف تولد فولتية صغيرة وتزود تياراً. والخلايا مرتبطة سوية لتجهز فولتية وتيار شاملين للاستخدام المباشر أو للخزن في بطاريات.

وتتولد الكهرباء بالتأثير الضوئي الفولتائي في مواد شبه موصلة عندما يجري امتصاص فوتون من ضوء الشمس في المادة ويحفز حامل شحنه مثل الإلكترون. وتساعد هذه الطاقة حامل الشحنة في التغلب على حاجز جهد كهربائي عند وصلة شبه الموصل في الخلية. والوصلات خاصية مميزة للعديد من العدد شبه الموصلة بما فيها الترانسيستور. ويجري صنعها بواسطة تلويث منطقتين متجاورتين من المادة بشوائب مختلفة. وتسبب الشوائب على أحد الجانبين زيادة في الحوامل السالبة (إلكترونات جوالة) بينما تسبب على الجانب الثاني زيادة في الحوامل المشحونة



الشكل ج ـ 18: منشأة فوتوفولتائية شمسية.
تقدمة: منشأة القدرة الكهربائية الأميركية.

موجباً (المدعوة بالثقوب). وتدعى المنطقة الانتقالية بين الجانبين بمنطقة الوصلة وفيها حاجز كامن للفولتية تسببه الأيونات المثبتة للقطبيات ذات الشحنات المتعاكسة في المادتين المتجاورتين.

وإذا حصل حامل شحنة جوال ما يكفي من الطاقة من فوتون شمسي ليتغلب على جهد الحاجز عند الوصلة فسيكون الحامل في موقف يؤدي فيه شغلاً كهربائياً مفيداً. وهذا ناشئ من الأسس الفيزيائية الموضحة في الملحق أ وله مماثله الميكانيكي في القدرة الهيدروليكية حيث تمتلك كتلة من الماء طاقة جذبية كامنة إذا ما رفعت إلى علو.

وتعتمد كفاءة التحويل الضوئي الفولتائي على عاملين رئيسين: الخسارات الضوئية وارتفاع الحاجز عند الوصلة (أي الجهد الكهربائي الناشىء عبر منطقة الوصلة وعادة ما يقاس بالإلكترون ـ فولت: انظر الملحق أ). أما الخسارات الضوئية مثل الانعكاس من سطح الخلية فيمكن تقليلها من خلال تصميم ضوئي جيد في حين تمثل كفاءة تحويل الحوامل عبر عوائق الوصلة القيود الأساسية.

وسبب هذه التحديدات على كفاءة التحويل الضوئي الفولتائي يعود إلى عدم قدرة الوصلة شبه الموصلة على توفير التحويل لمجمل مدى الطيف الشمسي لنور الشمس الساقط. ويحدث التحويل الضوئي الفولتائي في أفضل صورة عندما تكون طاقة الفوتون الساقط مساوية تماماً لفرق الطاقة لوصلة الحاجز وبذلك تمتص كل طاقة الفوتون في أخذها لحامل الشحنة عبر جهد الوصلة. وإذا كانت طاقة الفوتون أقل من جهد الحاجز فسوف لن يحدث التحويل وإذا ما كانت أكبر فسيتبدد جزء من طاقة الفوتون.

وهناك نوع جديد من الخلايا الشمسية تدعى الوصلة الترادفية (Tandem Junction) وفيها عدة وصلات مصنّعة سوية إلا أنها ذات جهود متباينة. وتستطيع هذه الوصل الترادفية من تغطية جزء أكبر من الطيف الشمسي غير أن المحددات الأساسية مازالت موجودة. والوصل الترادفية إضافة إلى ذلك ذات كلفة تصنيعية أعلى. ويغطي الطيف الشمسي بمجمله طاقات فوتونات ذات مدى يتراوح بين 1 و 10. ومن الواضح أن التحويل الضوئي الفولتائي سيكون على أفضله فقط لمجال ضيق ضمن الانتشار الطيفي. والخلايا الشمسية السيليكونية ذات الطبقة الواحدة – وهي أرخص الأنواع وأسهلها تصنيعاً – تحول الآن ما لا يزيد على 15 في المئة من الطاقة الشمسية الساقطة إلى كهرباء أو نصف حدها الأعلى تقريباً. وتنصبّ جهود البحث والتطوير التي ترعاها الحكومة والصناعة على تحسين كفاءة العدد السليكونية وعلى البحث عن أشباه موصلات أخرى ذات كفاءة أفضل. ولبعض المواد مثل زرنيخيد الغاليوم كفاءة نظرية أفضل. وما يحدد التطبيقات القائمة اليوم للتكنولوجيا الضوئية الفولتائية مثل تلك المتعلقة باستخدام الطاقة الشمسية للأغراض الحرارية هي الكلفة الرأسمالية العالية ومحدودية توفر الشمس (انظر الفصل الحادي عشر). وتحدد كلفة الخلايا الشمسية من خلال الحالة الراهنة لتكنولوجيا أشباه الموصلات وصناعتها. وهناك حاجة إلى تطويرات جديدة ـ وقد تكون ممكنة ـ للسماح بصناعة كميات كبيرة من الخلايا الضوئية الفولتائية بكلفة رخيصة وبكفاءة تقارب الحدود النظرية. والاعتقاد العام السائد أن هذه الأهداف ممكنة التحقيق في النهاية من خلال تطوير مواد وتقنيات تصنيع أشباه الموصلات، إلا أن احتمالية تحقق ذلك على المدى قريب ليست أكيدة (انظر الفصل العاشر).

وعلينا أن نلاحظ وجود تقنية ترفع الكفاءات بصورة كبيرة وهي: التركيز. والفكرة هي في تركيز نور الشمس في بؤرة، بشدة تبلغ مئة إلى عشرة آلاف مرة شدته العادية. غير أن التركيزبهذه الطريقة، كما يقال، سيزيد من كلفة الخلية لوحدة المساحة كثيراً لأن كمية الطاقة المحولة ستكون أكثر. غير أن كلفة تصنيع هذه الخلايا عاليه جداً، لذا فهي غير تنافسية تجارياً بمقاييس الوقت الحالي، ويجب أن تكون كلفة إنتاج الوحدة في خط إنتاجي كثيف أرخص بكثير.

أنواع الخزن المتقدمة

الخزن التقليدي

الخزن بالنسبة إلى العديد من أنواع تكنولوجيات الطاقة أمر حاسم. وإذا ما اعتبرنا أن خزن أنواع الوقود هو خزن للطاقة المضمنة في هذه الأنواع فسيكون النفط مثالاً ممتازاً. فالكميات الهائلة من النفط الخام المخزون في أنحاء العالم ضرورية للتوافرية الاقتصادية والقول للبنزين ونفط الوقود والبتروكيميائيات.

وتخزن شركات تجهيز الكهرباء الطاقة باللجوء إلى ما يعرف بالخزن بواسطة الضخ (Pumped Storage). فالكهرباء المولدة في المحطات الحرارية تستغل لإدارة مضخات كبيرة تقوم بضخ الماء إلى مناطق خزن مرتفعة خلال فترة الحمل الكهربائي المنخفض ـ الساعات خارج فترة الذروة ـ ويصار إلى إطلاق الماء من خزاناته المرتفعة ليولد طاقة كهربائية في توربينات مائية خلال فترات حمل الذروة.

ويمكن كذلك خزن الكهرباء في بطاريات. والبطارية الحالية في السيارات، لكي نستخدم مثالاً مهماً وواسع الاستخدام، تفيد في بدء تشغيل الاحتراق الداخلي للمحرك لكنها لا تستخدم للتحريك.

وأخيراً نذكر أن خزن الطاقة يشمل خزن الحرارة. فنحن بالتعابير الثيرموديناميكية ننظر في خزن الحرارة المحولة (الملحق أ) قبل أن يجري الاستفادة منها. والممارسة القديمة العهد التي ما زالت متبعة حتى الآن هي خزن الماء الساخن في الدور وفي المصانع. ومثل هذه الطريقة للخزن تهدف إلى تنظيم تسليم الماء الساخن أو البخار غير أنها لا تفيد لفترة تتجاوز اليوم الواحد.

وما نعنيه بأنواع الخزن المتقدمة – تكنولوجيا جديدة ليست قيد الاستعمال التقليدي – هو جزء متكامل مع تكنولوجيات أخرى جديدة ستزداد جدواها بواسطة الابتكار في وسائل الخزن. وستفيد تكنولوجيات الرياح والشمس على وجه الخصوص من هذا التقدم، وربما تؤدي تكنولوجيات الخزن الجديدة أيضاً إلى السيارة الكهربائية.

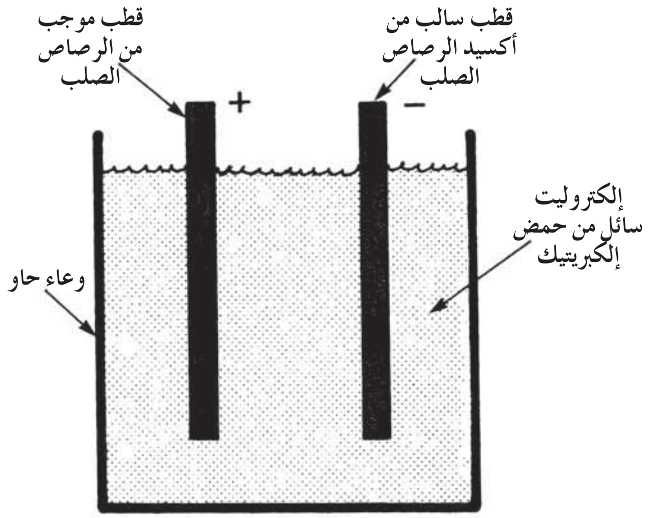
البطاريات المتقدمة

تعتبر التطويرات الجديدة للبطاريات مهمة لتشغيل المولدات (الكهربائية) العاملة بقوة الرياح أو بالتحويل الضوئي الفولتائي لنور الشمس والتي تعمل وحدها. كذلك فالحاجة إلى البطاريات قائمة لمحطات التوليد المركزية بدل القدرة المائية العاملة بالضخ وأيضاً للسيارات الكهربائية. غير أن جميع هذه التطبيقات تحتاج إلى تحسينات رئيسة في المواصفات التقنية وإلى تقليل كلفة تقنيات الخزن.

تمثل مفاهيم البطاريات المتقدمة تحويرات على بطاريات الخزن التقليدية التي تستخدم الرصاص – الحمض. وتعمل هذه البطارية على قاعدة الخلية الغلفانية التي يعود اكتشافها إلى القرن الثامن عشر. وتتألف بطارية الخلية الواحدة من قطبين مغمورين في سائل إلكتروليتي (الشكل ج ـ 19) وتطلق التفاعلات الكيميائية للمواد عند كل من القطبين إلكترونات ذات جهد لأداء شغل كهربائي. وأحد القطبين في بطارية الرصاص – الحمض هو الرصاص (Pb) والقطب الآخر مصنوع من أكسيد الرصاص (PbO_2). أما الإلكتروليت فهو حمض الكبريتيك (H_2SO_4). ولكي تجهز البطارية كهرباء، تزود الإلكترونات إلى قطب أكسيد الرصاص من القطب الرصاصي. غير أن التركيب الكيميائي يتغير عندما تفرغ البطارية من الطاقة. ونتمكن من رؤية هذا من خلال كتابة المعادلة الكهروكيميائية.

$$PbO_2 + Pb + 2H_2SO_4 \longrightarrow 2PbSO_2 + 2H_2O$$

حيث تشير الجهة اليمنى إلى نواتج التفريغ. وتترسب كبريتات الرصاص (PBO_2) الناتجة عن القطبين في حين يمتزج الماء مع محلول الإلكتروليت. وتتراكم المواد بالطبع مع استمرار التفريغ حتى تصبح البطارية في النهاية غير منتجة للكهرباء.



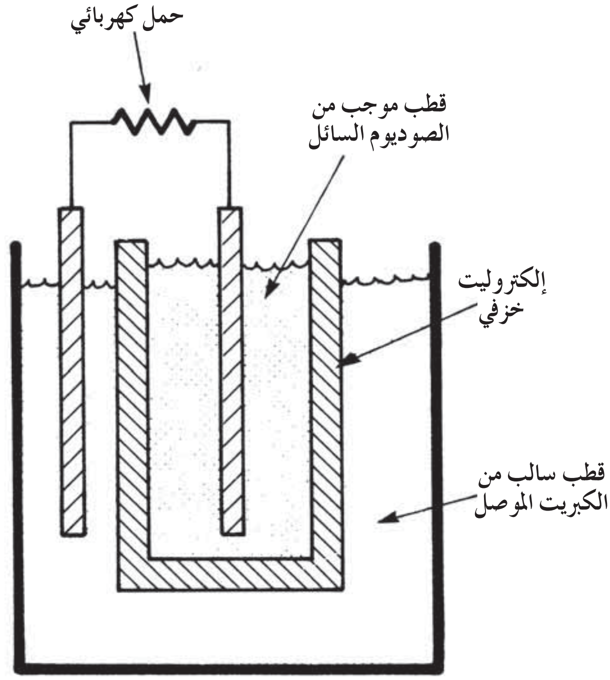
الشكل ج ـ 19: بطارية الرصاص ـ الحمض.

ومع ذلك فالتفاعل قابل للعكس إذ يمكن إعادة شحن بطارية الخزن من مصدر للتيار المستمر (D.C) أي من مولد. وينعكس تدفق الشحن في الخلية وتعكس كذلك التفاعلات من كبريتات الرصاص لتعود إلى أكسيد الرصاص على القطب الموجب إلى الرصاص على القطب السالب إلى حمض الكبريتيك في الإلكتروليت. ويمكن إعادة دورة التفريغ وإعادة الشحن في عدد محدود من المرات بسبب تردي الأقطاب والإلكتروليت. وهذا ما يحدد دورات حياة البطارية. ويبلغ عدد هذه الدورات لبطاريات الرصاص – الحمض في السيارات نحو 300 دورة، وإذا ما استخدمت هذه في تطبيقات مع خلايا شمسية مع دورة يومية فلن تدوم أكثر من سنة. أما بطاريات الرصاص – الحمض للخزن من الفئة الصناعية فلها خمسة أضعاف هذا العدد من دورات الحياة، لكنها تكلف ضعف كلفة النوع العادي ولن تكون ذات جدوى اقتصادية لمثل هذه الخدمة. وبطارية الرصاص – الحمض للخزن ذات عمر قصير ولا تعتبر ملائمة للاستخدامات التي نحن بصددها. وهي كذلك كبيرة وثقيلة الوزن خاصة لتشغيل السيارات الكهربائية.

ورغم أن البطاريات المتقدمة المقترحة تعمل على الأسس الغلفانية نفسها كالبطاريات التقليدية، إلا أن ابتكارات جديدة رئيسة قد جُرِّبت في تصنيعها

وتشغيلها. وقد جرى اللجوء إلى السوائل لتصنيع الأقطاب بدلاً من المواد الصلبة لتجنب قضية صدأ الأقطاب الصلبة والترسبات عليها. وبطارية الصوديوم كبريت (الشكل ج ـ 20) التي اخترعت في شركة فورد للسيارات في الستينيات مثال على ذلك. يتألف القطبان في هذه البطارية التجريبية من الصوديوم المصهور ومن مزيج مصهور من الكربون – الكبريت، ولا يقتصر الأمر في هذه البطاريات التي تستخدم المواد المصهورة على تقليل الصدأ فهي تمتاز أيضاً بتمديد عمر دورة الإلكترودات.

غير أن هذه البطاريات لها سلبياتها. فهي تحتاج في التشغيل إلى درجات حرارة عالية ضمن المدى 300 إلى 350° درجة مئوية ويمكن أن تقدم مجازفة آمنة السيارات الكهربائية. وهي ما زالت ثقيلة جداً ومكلفة. أما الأنواع الأخرى من البطاريات التجريبية مثل بطارية الزنك ـ الكلور وبطارية الليثيوم ـ كبريتيد الحديد فقد بدت فيها سلبيات مشابهة.



الشكل ج ـ 20
شكل تخطيطي لبطارية كبريت ـ صوديوم

وبذلك نرى أن كلفة أنظمة – الخزن الكهربائي ليست تنافسية في الوقت الحالي.

فالخزن بالبطاريات مثلاً قد يكلف ما قدره 50 في المئة أكثر من الخزن بواسطة ضخ الماء. وهدف مطوري البطاريات المتقدمة من حيث الكلفة هو الوصول بالكلفة إلى نصف كلفة بطاريات الرصاص – الحامض الحالية للخدمات الثقيلة.

إن إحدى طرق تخفيض كلفة بطاريات الخزن هو من خلال تمديد عمر خدمتها. ويهدف مطورو البطاريات المتقدمة إلى الحصول على دورات حياة تزيد على 2000 دورة وعمر تشغيلي يزيد على عشر سنوات (يجب أن نلاحظ أن دورة في اليوم تعني 3650 دورة لمدة عشر سنوات).

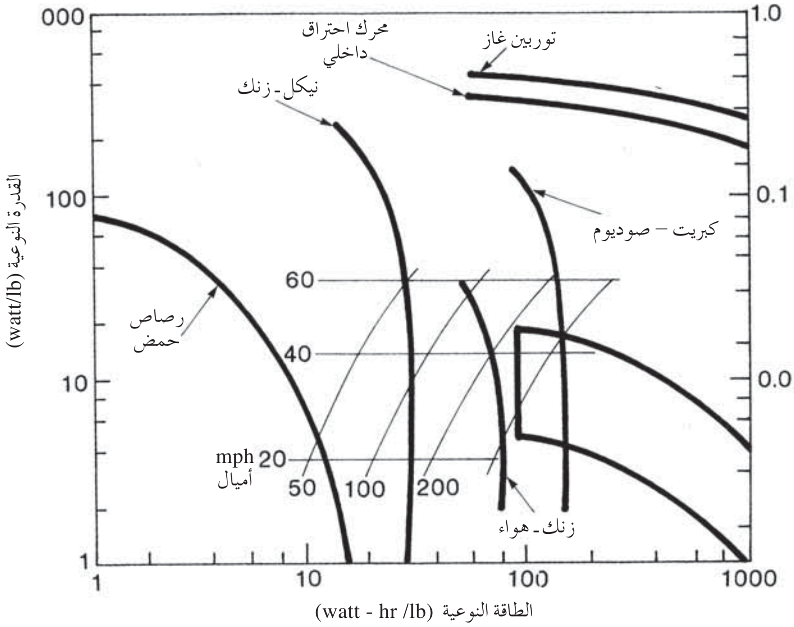
أما العمر التشغيلي لمنشأة ضخ قدرة مائية تقليدية فيمكن على سبيل المقارنة أن يصل إلى خمسين سنة كما إن عدد دورات الشحن والتفريغ لا يمثل تحديدات قيوداً إضافية على التكنولوجيا. وهذا له مترتبات اقتصادية مهمة لأن الكلفة الرأسمالية للمعدات عادة ما تطفأ عبر مدد لا تتجاوز العمر التشغيلي للمعدات. والعمر القصير المتوقع حالياً من البطاريات يعني أن الكلف المتوقعة للطاقة المنتجة ستكون أعلى بنحو 50 في المئة من تلك المولدة من القدرة المائية في منشأة الضخ. وهكذا ستكون كلفة الطاقة التي يستلمها الزبون أعلى لذلك الجزء منها المنتج من البطاريات. ويمكن احتساب الكلفة في الأنظمة العاملة وحدها والتي تشمل البطاريات مثل المولدات من طاقة الرياح من أخذ عوامل التشغيل المختلفة بنظر الاعتبار إذا كانت التوفرية العالية هي الهدف.

ومن الواضح من ذلك أن الوصول إلى الجدوى الاقتصادية لتوليد الطاقة من الرياح أو الشمس على مجال واسع يتطلب طاقات خزن أكبر بكثير. أي إن النظام يجب أن يكون قادراً على خزن ما يعادل استخدام بضعة أيام من الطاقة بحيث يكون قادراً على إنتاج الطاقة بوتيرة الاستهلاك اليومي نفسها خلال فترات محدودية الرياح أو الطاقة الشمسية.

أخيراً يجب أن تكون متطلبات الوزن والحجم للبطاريات قادرة على التنافس تقنياً مع بعض التكنولوجيات التقليدية. والوزن هو أهم المتطلبات التقنية إذا ما كانت

البطاريات ستصبح وسائل خزن الطاقة في السيارات الكهربائية وبذلك تصبح معادلة لخزان بنزين في السيارة أو الشاحنة. وهناك بالفعل عاملان متعلقان بالوزن: وهما الطاقة النوعية (Specific Energy) والقدرة النوعية (Specific Power). وتعني الطاقة النوعية مقدار الطاقة المخزونة لوحدة الوزن لسيارة تستخدم نوعاً محدداً من تكنولوجيا خزن الطاقة وتقاس بالواط – ساعة لكل باوند. أما القدرة النوعية فتعني مقدار القدرة المنتجة من تلك الطاقة لكل باوند من وزن السيارة وتقاس عادة بالواط لكل باوند. والمدى الذي تبلغه رحلة السيارة يتناسب بصورة تقريبية مع طاقتها النوعية في حين أن السرعة التي تبلغها تتناسب تقريباً مع قدرتها النوعية.

ويبين الشكل ج ـ21 المواصفات الوزنية – النوعية لعدة أنواع من البطاريات يفترض أن كلاً منها يعمل في سيارة كهربائية. ويمثل منحنى بطارية الرصاص – الحامض معنى بقية المنحنيات. فكلما زادت القدرة تناقصت سعة الخزن والعكس صحيح. ويبين منحنى الرصاص – الحامض مثلاً أن بإمكان سيارة كهربائية امتلاك دائرة عمل قطرها 50 ميلاً وأن تصل سرعتها إلى 25 ميلاً في الساعة كواحد من التوافيق التشغيلية الممكنة.



الشكل ج ـ21: الخواص الوزنية – النوعية لأنظمة خزن الطاقة مقتبسة من Dorf, 1978 (انظر مراجع الفصل الثاني).

وتظهر منحنيات بعض البطاريات المتقدمة المقترحة مثل النيكل – الزنك والزنك – الهواء – والكبريت ـ الصوديوم تحسناً كبيراً مقارنة ببطارية الرصاص – الحامض. وكل إزاحة إلى اليمين (في الشكل ج ـ21) تعني زيادة في مدى الرحلة وهكذا فإن بطارية الكبريت ـ الصوديوم يمكن أن يكون لها مدى يبلغ 250 ميلاً بسرعة تبلغ 40 ميلاً في الساعة.

وعندما نقوم بعد ذلك بمقارنة البطاريات مقابل تكنولوجيات السيارات الأخرى نرى البطاريات من الأنواع المتقدمة هي الوحيدة التي تتمكن أن تكون منافسة تقنياً. يقع أفضل أداء في الزاوية العليا اليمنى في المخطط الوزني – النوعي. ويقع في تلك المنطقة محرك الاحتراق الداخلي طبعاً. وهذا يعني أن قابلية السيارات الكهربائية يجب أن تتطور أكثر من هذا حتى تصبح منافسة لتكنولوجيا الوقود ذات الأصل النفطي والمحرك الحراري (انظر الفصل الثالث).

الخزن الحراري المتقدم

إن تقنية خزن الحرارة التقليدية في صهاريج الماء الساخن هي مثال لاستخدام الخاصية الفيزيائية لخزن الحرارة المحسوسة. ويجري في هذه الطريقة للخزن تحويل الطاقة الحرارية (أو «إضافة حرارة» انظرالملحق أ) إلى وسط ما وأن يكون الارتفاع في درجة الحرارة متناسباً مع الحرارة المضافة طالما لا تغير المادة حالتها. وتبعاً لذلك فإن الماء مادة جيدة لخزن الحرارة المحسوسة طالما بقي سائلاً.

ويمكن أن تخزن الحرارة أيضاً من خلال دفع الهواء خلال طبقة من الحصى أو الحجارة المسامية مثلاً. وما إن تسخن الصخور إلى درجة حرارة عالية تكون الحرارة قد خزنت – ويمكن استرجاعها من خلال إمرار هواء أبرد خلال الطبقة.

والماء على أي حال أفضل وسط للحرارة المحسوسة لكل وحدة حجمية من المادة المستخدمة (انظر الجدول ج ـ3). والحرارة النوعية هي ثابت التناسب للحرارة المحسوسة معبراً عنها بالوحدات الحرارية البريطانية لكل باوند من المادة لكل درجة حرارة فهرنهايتية واحدة.

الجدول ج.3 مواد الحرارة المحسوسة

مادة الحرارة المحسوسة	الحرارة النوعية (BTU/lb°F)	الكثافة الحقيقة lb/ft³	المحتوى الحراري BTU/ /ft³ °F من دون فجوات	30 ٪ فجوات
الماء	1.0	62	62	–
حديد خردة	*0.12	490	59	41
مغناتيت (Fe_3O_4)	*0.18	320	57	40
ألمنيوم خردة	*0.23	170	39	27
الحجر	0.21	~170	36	25
صوديوم(لغاية 208 °F)	0.23	59	14	–

* من 77° إلى 600°F

المصدر: مقتبسة من: Hottel and Howard (1971)

وربما تمثل الأنظمة الحرارية – الشمسية أفضل مثال لاستخدامات – الخزن المتقدمة. وعندما يُستخدم الماء كوسط للخزن يتحقق الخزن بواسطة ملفات تبادل حرارية في الصهريج (انظر الشكل 11-3 أ) يمرر من خلالها سائل تبريد ساخن من المجمِع الشمسي. وعندما تكون وتيرة التبادل الحراري الخارجة من الصهريج أقل من وتيرة مدخول الحرارة من المجمِّع ترتفع درجة حرارة الماء في الصهريج وتُخزن الحرارة. وعلى عكس ذلك إذا ما كانت وتيرة صدور الحرارة أكبر من وتيرة دخولها فستزود الحرارة من المخزون وتهبط درجة حرارة الماء في الصهريج. وتفعّل عمليات التبادل الحراري إذا كان سائل التبريد من المجمِّع أسخن من الماء في الصهريج. وينال التبادل الحراري مساعدة بوضع ملف المدخول في الجزء الأسفل ـ وبذلك يكون الأبرد – من الصهريج ويوضع ملف المنتوج في الجزء العلوي الأسخن.

والنمط المنزلي اليومي لاستخدام الماء دوري يرتفع أثناء النهار أو في فترة ذروة المساء المبكر ويهبط متأخراً في نهاية الليل. ويمتلك الماء الساخن والبخار في الصناعة أيضاً دورات استخدام يومية وغالباً ما يكون الاستخدام محصوراً في ساعات العمل اليومية ويهبط إلى الصفر في نهاية الأسبوع والعطل. إن استخدام الخزن قصير المدى يمكن أن يمدد ساعات تزويد الحرارة إلى المساء وربما إلى صباح اليوم التالي.

إلا أن أي محاولة لزيادة إمكانية الخزن قصير المدى تتطلب مقادير متزايدة باستمرار من مساحة المجمّع وهذا بدوره يزيد من الكلفة الرأسمالية. ولما كانت كلفة الطاقة الشمسية تنافسية بالحد الأدنى فقط حينما تكون مساحة المجمع كافية لتجهيزات يوم واحد فقط ، فستكون أي محاولة لجمع وخزن الحرارة عدة أيام عملية مكلفة محرمة حالياً.

وصهاريج الخزن للماء الحار المسخن شمسياً كبيرة إلى حد بعيد الآن. خذ حالة الماء الساخن البيتي. فعائلة من أربعة أشخاص قد تستخدم 75000 وحدة حرارية بريطانية يومياً للماء الساخن. والمجمع النمطي الشمسي سيمتلك مساحة تقارب من 150 قدم مربع وصهريج خزن (2.5 غالون خزن لكل قدم مربع من المجمع) سعة 37.5 غالون. وهذا يمثل حجماً يبلغ 2800 قدم مكعب ـ وهو حجم كبير نوعاً ما لبيت متوسط الحجم ويتطلب خزاناً أسطوانياً قطره 12 قدماً وطوله 28 قدماً. أما المنظومة الشمسية التي تزود الحرارة لتدفئة البيت فستحتاج إلى صهريج يبلغ حجمه عشرة أضعاف هذا الحجم. (ولغرض الخزن الحراري للهواء المسخن بالطاقة الشمسية للتدفئة المنزلية سيكون المتطلب الحجمي حتى أكبر من هذا).

ويمكن التقليل من أحجام الخزن بصورة كبيرة من خلال استخدام مواد الحرارة الكامنة. فخزن البخار بضغط عالٍ مثلاً قد جرى النظر فيه للاستخدامات الصناعية الكبيرة بدرجات حرارية عالية أو لعمليات توليد الكهرباء. و جرى النظر للاستخدامات بدرجات حرارية أدنى مثل تدفئة الماء المنزلي أو تدفئة المنازل، في مواد صلبة يتحول طورها. ويبين الجدول ج.4 بعض مواد الحرارة الكامنة العادية التي تنصهر عند درجات حرارة عالية وبذلك تمتص حرارة كامنة في تبديل الطور من حالة صلبة إلى أخرى سائلة. ويمكن مقارنة السعات الحرارية لوحدة حجوم هذه المواد بمواد الحرارة المحسوسة.

ولم يجرِ استخدام مواد الحرارة الكامنة على أي حال للخزن في الاستخدامات الشمسية والحرارية الأخرى. والسبب الفني هو الوقت الطويل المطلوب لتغير الطور ومن ثم طول أوقات الشحن – تفريغ الشحن. كذلك وُجِد أن بعض المواد مثل ملح غلاوبر تتحلل بعد دورات متكررة إلى ملح كبريتات الصوديوم البسيط. ثم ترسب من

المحلول السائل. وهناك بحوث إضافية تجري على هذه المركبات في المختبرات الحكومية.

الجدول ج.4 مواد الحرارة الكامنة

مادة الحرارة الكامنة	نقطة الانصهار °F	الكثافة (باوند/ قدم مكعب)	حرارة الاندماج: وحدة حرارية – بريطانية للباوند	حرارة الاندماج: وحدة حرارية بريطانية للقدم المكعب
كلوريد الكالسيوم	84 – 102	102	75	7900
ملح غلاوبر	90	92	105	9700
الصوديوم المعدني	208	59	42	2500
نترات الليثيوم	482	149	158	23500
هيدريد الليثيوم	1260	51	1800	92000

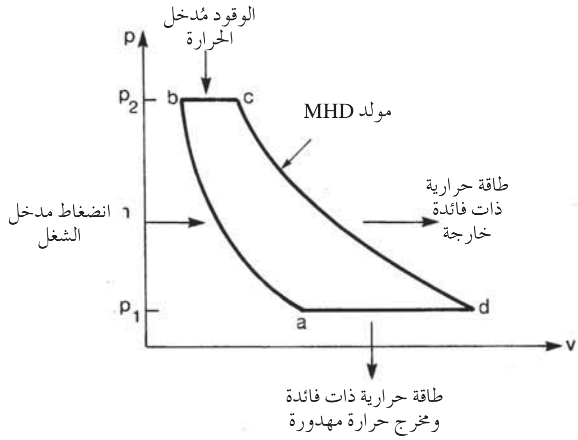
المصدر: مقتبسة من: H.C. Hottel and J. B. Howard.
«New Energy Technology: Some Facts and Assessments», MIT Press, Cambridge. MA. 1971.

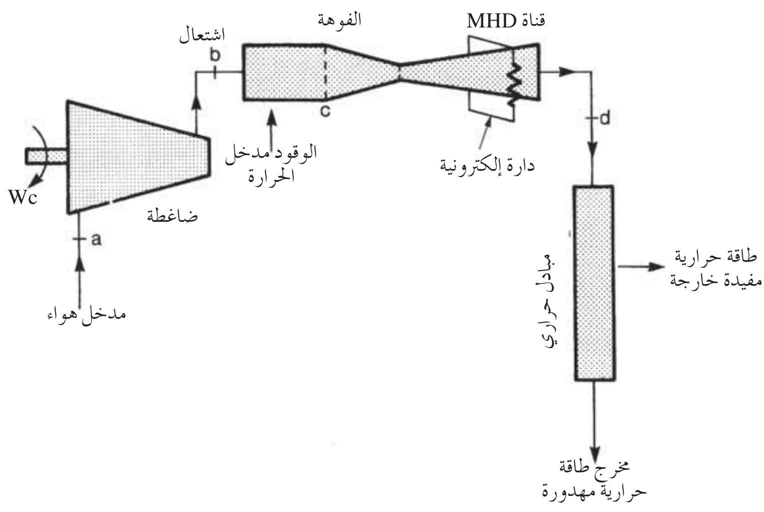
هناك أخيراً صنف من الخزن الحراري طويل المدى لم يجد إلا استخداماً محدوداً وهذا ما يدعى بالخزن الفصلي ويتضمن خزن الحرارة أو خزن البرودة في باطن الأرض في مكامن المياه عادة. وكل من المضخات الحرارية وتكييف الهواء هما عمليات تبادل حراري وتعتمدان على اختلاف درجات الحرارة لتعملان بكفاءة. يمكن للمضخات الحرارية مثلاً العمل باستبدال الطاقة الحرارية من الهواء الجوي في الخارج غير أن كفاءتها تتدهور بسرعة عندما تهبط درجة الحرارة في الخارج دون الانجماد. ويمكن للمضخات الحرارية أن تعمل في جو درجة حرارته دون الانجماد بوضع ملفاتها تحت الأرض حيث تبقى درجة الحرارة فوق درجة الانجماد. أما التكييف الصيفي فيستخدم بالطبع خزاناً من مواد ذات درجة حرارة أدنى تحت الأرض. ولم يجد الخزن الفصلي استخداماً واسعاً بسبب الكلف الاستثمارية والتشغيلية المضافة.

ديناميكيات الموائع المغنطيسية

تعتبر ديناميكيات الموائع المغنطيسية (Magnetohydrodynamics) أو MHD للاختصار

وسيلة للتحويل المباشر للطاقة الحرارية من الوقود الأحفوري إلى كهرباء تلغي الخطوة الوسطية التي تحولها إلى طاقة ميكانيكية. وتوفر هذه الطريقة إمكانية الحصول على كفاءة حرارية أعلى لمحطات القدرة وهي واحدة من بضع تكنولوجيات متقدمة ممكنة للوقود الأحفوري يمكن أن تخفض تلوث الهواء.



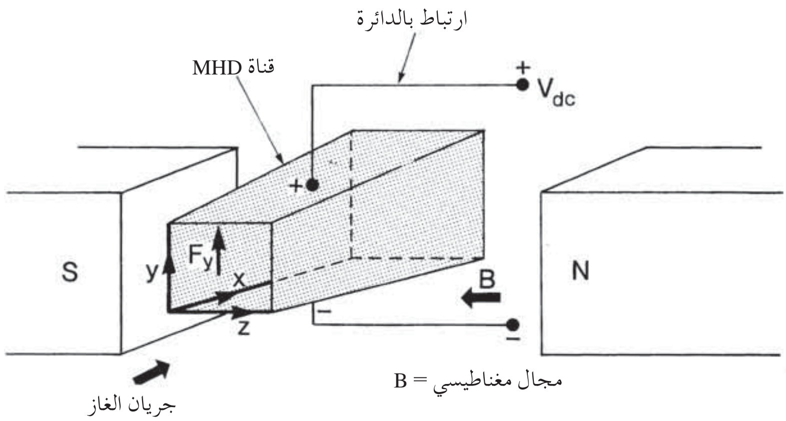


الشكل ج - 22

مولد ديناميك الموائع المغنطيسية (MHI). مقتبس من: J. H. Krenz. Energy Conversion and Utilization. Allyn and Bacon, Boston, MA. 1984.

ورغم كون الطريقة تمثل مفهوماً مستحدثاً إلا أنها تستند إلى قواعد الثيرموديناميكا وتوليد الكهرباء التقليدية. والدورة الثيرموديناميكية لـ MHD شبيهة إلى حد كبير بتلك التي تمثل توربين الاحتراق (انظر الفصل الثالث). ويبين الشكل ج ـ 22 دورة مفتوحة ترفع فيها الضاغطة ضغط الهواء الداخل ودرجة حرارته ليمزج بعد ذلك مع الوقود ليجري حرقه كما في توربين الاحتراق الغازي. غير أن فوهة وقناة MHD تحل محل التوربين لغرض تمدد الغازات في الدورة الحرارية. ويجري توليد الكهرباء في قناة MHD بصورة مباشرة من خلال حركة الإلكترونات والأيونات في غازات الاحتراق المتمددة عندما تمر خلال مجال مغنطيسي مسلط في تلك المنطقة.

وتحدث الحركة عالية السرعة للغاز في قناة MHD من خلال إمراره في فوهة بضغط عالٍ ودرجة حرارة عالية (2500° – 3000° مئوية). ويكتسب الغاز سرعة عند مروره بالفوهة التي تتوسع عند مخرجها. ويجري تسليط مغنطيس كهربائي كبير على جانبي قناة MHD بحيث يتقاطع المجال المغنطيسي بصورة عمودية مع اتجاه جريان الغاز في القناة (انظر الشكل ج ـ 23).



الشكل ج -23
مقطع لقناة MHD مع قطع الأقطاب المغنطيسية والارتباط بالدائرة الكهربائية مقتبس من:
J. H. Krenz, «Energy Conversion and Utilization» Boston, MA. Allyn and Bacon, 1984.

ويستحدث جهد كهربائي عبر قناة MHD من خلال جريان الجسيمات المشحونة خلال المجال المغنطيسي. وقاعدة حدوث هذه الظاهرة هي أساساً ذاتها التي تنطبق

على موصل يحمل تياراً عندما يتقاطع مع مجال مغنطيسي في مولد كهرباء تقليدي. ويكون الانحراف المغناطيسي للشحنة هنا مساوياً لقوة مجال كهربائي في اتجاه عمودي على كل من جريان الغاز والمجال المغنطيسي (الشكل ج ـ 23). وتدعى هذه القوة (Fy في الشكل) بقوة لورنتز (والتسمية نسبة إلى الفيزيائي الهولندي هـ. لورنتز 1853 – 1928). وتسبب هذه القوة تراكم شحنات موجبة على أحد الجدران وشحنات سالبة على الجدار المقابل لقناة .MHD ويسبب تراكم الشحنات مجالاً كهربائياً يعاكس قوة لورنتز وبذلك يحدث توازناً بينهما. والجداران المتعاكسان معزولان كهربائياً عن بعضهما بالطبع وبذلك يتولد فرق جهد بينهما. وعند وصل دائرة كهربائية عبر القطبين الجدارين يسري تيار بينهما.

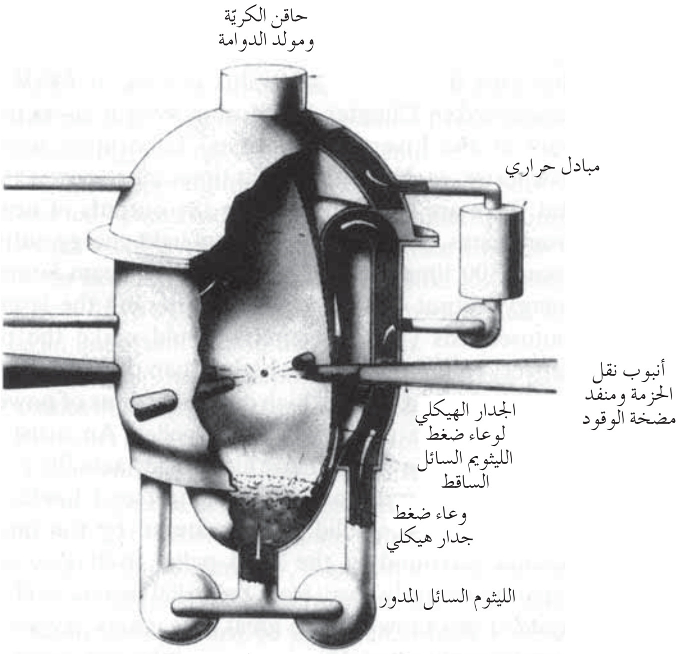
غير أن هذا الوصف تغاضى عن بعض الاعتبارات العملية. فكفاءات التحويل العالية تتطلب درجات حرارية عالية عند بدء الدورة وهذا بدوره يتطلب تبطين الفوهة والقناة بمواد مقاومة للحرارة وقادرة على تحمل درجة حرارة تبلغ عدة آلاف درجة. والنوعية الحالية من هذه المواد لم تطور تماماً لخدمة طويلة الأمد. كما إن التشغيل المستمر لأكثر من بضعة آلاف ساعة لم يتحقق.

والتصور الذهني لمولدات MHD هو أن تعمل بالاقتران مع عمليات التوليد التقليدية من الوقود الأحفوري. ويقوم مولد MHD وفي هذا النوع من عملية الدائرة الموحدة باستخدام الغازات المحترقة في درجات الحرارة العالية بينما تجهز حرارة MHD المهدورة فى نظام بخار تقليدي. وتصل الكفاءة الحرارية في مثل هذا التشغيل المدمج إلى 50 في المئة ويمكن أن تصل إلى 60 في المئة كما يعتقد (تذكران المحطات البخارية التقليدية ذات كفاءة حرارية أقل من 40 في المئة).

لقد بنيت مولدات MHD بصورة ريادية في الولايات المتحدة بدءاً بستينيات القرن العشرين. وكان هناك جهد متصاعد في تطويرها خلال أزمة الطاقة – أعقبه تباطؤٌ في الجهد وقد بذلت جهود لتطوير MHD كذلك في الاتحاد السوفياتي السابق واليابان والصين وبعض أقطار أوروبا الغربية.

اندماج الاحتباس القصوري

يبيّن الشكل ج - 24 مخطط وضعه فنان للاندماج الاحتباسي القصوري المساق بالليزر (Laser Driven Inertial Confinement Fusion) وتبين الصورة كريّة من وقود الاندماج (مثل الديوتيريوم، انظر الفصل الحادي عشر) متمركزة في نقطة تقاطع عدة حزم ليزرية. وقد جرى توقيت سقوط الكريّة لتكون في هذا الموقع بحيث يكون وصولها متزامناً مع نبضة قدرة عالية لإضاءة الليزر المطلقة في وقت واحد خلال كافة أنابيب نقل الحزم الليزرية (وهناك أربعة منها في الصورة). وتقوم الأضواء الليزرية الساقطة بتسخين وكبس كريّة الوقود مسببة اتقاد اندماجي ضمن فترة زمنية فائقة القِصَر. وعندما تتقد كرية الوقود يقوم الليثيوم السائل خارج غرفة كريّة الوقود مباشرة بامتصاص النيوترونات المنبعثة من تفاعلات الاندماج. ويعمل الليثيوم كمبرِّد ووسيلة لتوليد التريتيوم.



الشكل ج - 24

مفاعل اندماجي يعمل بالاحتباس القصوري. بسماح من: Lawrence Livermore Laboratory

عندما جرى اقتراح مثل مشاريع الاندماج هذه لأول مرّة في أواخر الستينيات استقبلت بحماس كبير من قبل المجتمع العلمي. وكان المفهوم بسيطاً بطريقة رائعة مقارنة بمشاريع الاحتباس المغنطيسي. إضافة إلى ذلك جرى التفكير مع التقدم السريع الذي كان يحصل في تقنيات الليزر آنذاك أن من الممكن تحقيق تقدم سريع بهذه الطريقة للوصول إلى تجربة تساوي الطاقة في عملية الاندماج. وقد نالت مشاريع الاندماج بواسطة الليزر الجديدة استحسان الجمهور كأعاجيب مستقبلية بسبب خواصها الغريبة.

وجرى بناء أنظمة متعددة حزم الأشعة الليزرية قادرة على إعطاء مخرجات شديدة القدرة في السبعينيات. فقد وفَّر نظام Helios الليزري الذي أنشئ في مختبر لوس ألاموس العلمي مثلاً نبضات من الأشعة تحت الحمراء في ثمان حزم ليزرية موجهة 10000 جول من طاقة الضوء على الهدف لمدة نانوثانية واحدة (10^{-9} ثانية). وكمية الطاقة المسلطة تساوي 1 تيراواط (10^{12} واط). وستكون كثافة الفيض الضوئي المتدفق على الهدف خلال فترة النانوثانية الواحدة هائلة. وإذا كانت كل حزم الليزر مثلاً مركزة على بقعة قطرها مليمتر واحد فستتجاوز شدة الفيض الضوئي 10^{14} واط/السنتمر المربع (W/cm^2) (قارن هذا الرقم بمعدل كثافة فيض نور الشمس البالغة $245\ W/m^2 = 0.0245\ W/cm^2$ حسبما ذكر في الفصل الحادي عشر. وقد بنيت بعد ذلك منظومات ليزر أشد قدرة في مختبر ليفرمور القومي وأيضاً في جامعة روشستر وكل منهما ذو قوة تفوق ليزر السبعينيات بثمان مرات. وهناك خطط لدمج مخرجات نحو مئتي حزمة ليزرية من هذا النوع وذلك ما يجعل مجمل ناتج طاقة الضوء أقوى 800 مرة من منظومة الليزر السابقة. وهذه الزيادة في طاقة الليزر يضاف إليها تقليل فترة النبضة إلى 0.1 نانوثانية (10^{-10} ثانية) سيزيد القدرة (سرعة إعطاء الطاقة) بنحو 8000 مرة عن قدرة الليزرات السابقة.

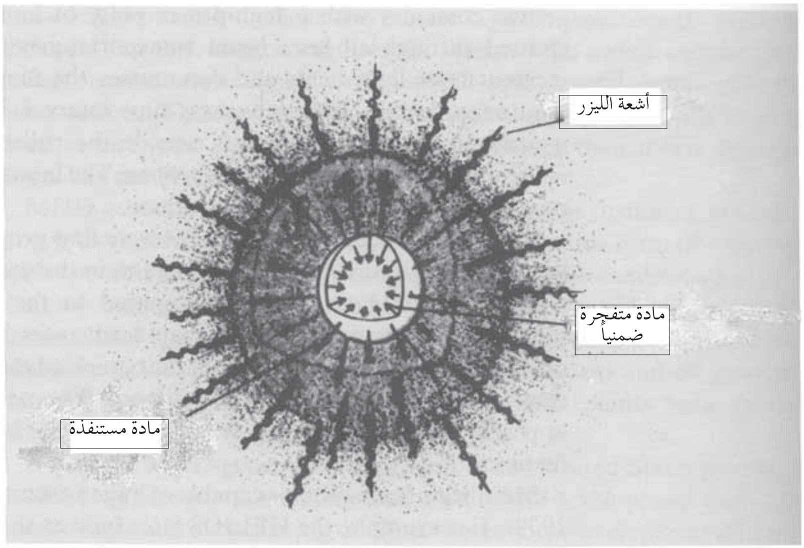
وستحدث مع هذا التركيز الهائل جداً للقدرة في الضوء الليزري حركيات عنيفة داخل كرية الوقود. ويمثل الشكل ج.25 تصوراً لهذه الحركيات وضعه فنان والحقيقة أن هذه الحركيات تتطور على مراحل. وأول مرحلة هي مرحلة تكوين البلازما (انظر الفصل الحادي عشر) التي تتأصل مباشرة من مادة الكرية الصلبة بواسطة التسخين الليزري السريع. وهذه البلازما التي تحيط بالكرية ذاتها تسخن إلى درجة حرارية

أعلى وتتمدد بصورة عنيفة منطلقة من الكرية – وهذه هي المرحلة الثانية. وقوة هذا الانطلاق كبيرة بدرجة تعمل كانطلاقة صاروخ تسبب موجة انضغاط تنتشر داخل الكرية. وقد أُحتُسب أن هذا الانضغاط يؤدي إلى كثافة لنوى النظير تزيد ألف مرة على الأقل عن كثافة الهيدروجين السائل وضغوط تعادل 10^{10} ضغط جوي ودرجة حرارة ضمن الكرية المكبوسة تصل إلى ملايين الدرجات المئوية. ويمكن تعزيز الانضغاط الذي سببه الليزر بواسطة إحاطة الكرية بغلاف من معدن ذي وزن ذري ثقيل مثل الذهب ويدعى هذا الغلاف هوهلراوم (Hohlraum) وهي كلمة ألمانية تعني تجويف. ويسبب التركيز الشديد لطاقة الليزر في النوى الثقيلة انبعاث أشعة سينية عالية الطاقة في كرة البلازما بصورة منتظمة من الغلاف المحيط مسبباً تسليط قوى ضاغطة هائلة بصورة متناظرة في الداخل. والانضغاط المتناظر مهم لتجنب استثارة البلازما (انظر الفصل الحادي عشر) وهو ما يحرف الطاقة عن مهمة التسخين. وكان تحقيق الانضغاط المتناظر صعباً مع قوة الحزم الليزرية المباشرة ذاتها، وهذا ما جعل تقنية الهوهلراوم خطوة مهمة في هذا البحث.

وتتضمن الحالة المثالية ترسباً إضافياً للحرارة من الضوء الليزري المصاحب لهذا التهاوي مما يفيد في رفع درجات الحرارة إلى حد أعلى داخل الكرية (إلى مئات ملايين درجة حرارية مئوية). وهذا كفيل بإيصال المادة إلى حالة الاتقاد – وهي المرحلة الثالثة من تسلسل الحركيات. ويقول التنظير إن تسلسل المراحل الثلاث الكلي يحدث ضمن فترة تقل عن نانوثانية واحدة. وفي حين جرت رؤية معظم المراحل الحركية تجريبياً، إلا أن الوصول إلى حالة الاتقاد لم ينجز بعد. وإذا ما جرى الوصول إلى هذه الحالة في النهاية فستكون المرحلة الأخيرة فقط من الاحتراق الحراري النووي قد لوحظت وعند ذلك فقط سنقول إن الجدوى العلمية لهذا النمط من التكنولوجيا الاندماجية قد جرى عرضها بوضوح.

الانهيار إلى الداخل بواسطة الليزر: يمتد الجو المحيط إلى ما يتجاوز قطر عدة قطيرات ويتكون قبل النبضة الرئيسية لليزر بواسطة نبضة أولية تستأصل بعض مادة الكرية السطحية. ويولد امتصاص ضوء الليزر في الجو الخارجي إلكترونات ساخنة. وعندما تتحرك الاكترونات إلى الداخل مسخنة الجو وسطح الكرية يزيد التشتت وتأثير الزاوية المجسمة التناظر الكروي. إن الاستئصال والانطلاق العنيفين من سطح

الكريّة يولد الضغوطات التي تساعد على انهيار الكريّة داخلياً. والتأثير أشبه بصاروخ كروي سريع الانطلاق، عند ذلك يخضع قلب الكريّة إلى احتراق نووي حراري.



الشكل ج.25

الاندماج بواسطة الليزر – مرحلة الانضغاط، وانهيار الكرية.

المصدر: *Physics Today* (August 1973) بسماح من University of California, Lawrence Livermorne Laboratory under The auspices of the US. Dept. of Energy

جرى دعم البحوث في احتباس البلازما قصورياً في برنامجين اتحاديين مختلفين لهما أهداف مختلفة. وأحد البرنامجين يهدف إلى الوصول إلى مفاعل اندماجي فاعل ينتج القدرة مثل ذلك الذي يبينه الشكل ج ـ 24. أما البرنامج الآخر فهو يحاول نمذجة المركبات الحرارية النووية للأسلحة التي تعتمد على الاندماج النووي (القنابل الهيدروجينية). إن تأثير الحزمة الليزرية في كريّة صغيرة أو بلازما (كتلك المبينة في الشكل ج ـ 25) يوفر مثالاً مصغراً (لزناد) من الانشطار النووي لقنبلة هيدروجينية. ويقدم هذا النوع من التجارب الوسيلة الوحيدة للتحقيق في سلوكية البلازما الساخنة الكثيفة للأسلحة الاندماجية من دون إجراء تفجيرات كاملة لقنابل هيدروجينية، وهي ممنوعة الآن حسب معاهدة دولية. وقد كان البرنامج الثاني يتلقى دائماً الجزء الأعظم من الدعم للبحوث في الاندماج القصوري. والحقيقة أن تمويل البحث والتطوير في الأسلحة الاندماجية كان لسنين عديدة مساوياً تقريباً لتمويل الاندماج بواسطة

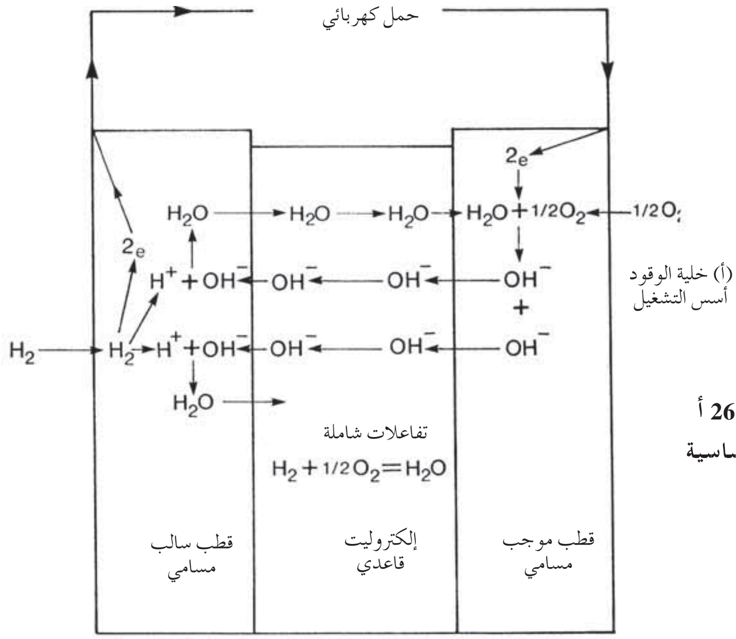
الاحتباس المغنطيسي. إلا أن الدعم للبحث والتطوير في الاحتباس المغنطسي قُلص بصورة كبيرة سنة 1995 (انظر الفصل الحادي عشر). وكانت هناك في الفصل التشريعي نفسه في الكونغرس مبادرة جديدة لدعم الاندماج القصوري بهيئة منشأة الاتقاد الوطنية حيث موِّل بناء مختبر لليزر بقيمة ملياري دولار في مختبر لورنس ليفرمور في كاليفورنيا. والهدف العلمي لهذه المنشأة هو احداث وضعيات «الاتقاد» للاندماج (انظر الشكل 11-24) في كريّة الديوتيريوم باستخدام أشعة ليزرية أو أيونية قوية. ولما كان الاتقاد حالة تفوق نقطة التساوي (انظر الفصل الحادي عشر) فإن هذا البرنامج أكثر طموحاً من الهدف الأولي لبرنامج الاحتواء المغنطيسي. ولكي تتحقق هذه الدرجة الحرارية يجب أن تقارب الحالة 100 كيلوفولت، وأن يصل الضغط إلى 10^{12} مرة ضغط جوي داخل الكريّة/ البلازما. والوصول إلى هذا الهدف غير مؤكد مثلما كانت أهداف الاحتواء المغنطيسي طوال سنين عديدة.

خلايا الوقود

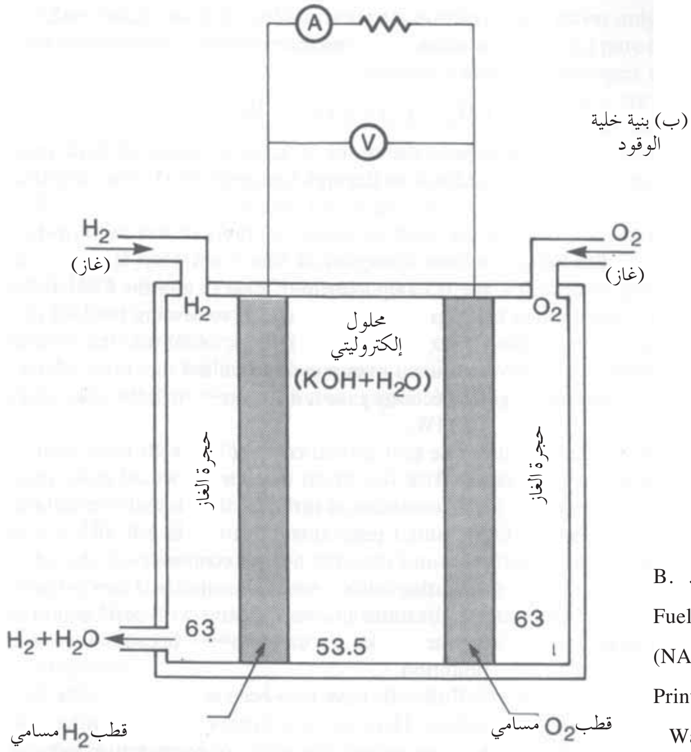
يبدو تركيب وعمل خلية الوقود لأول نظرة شبيهاً بالبطارية. فكلاهما يحولان الطاقة الكيميائية مباشرة إلى كهرباء باستخدام زوج من الأقطاب الغاطسة في الكتروليت. ومن ناحية ثانية فإن خلية الوقود تجهز باستمرار بالطاقة الكيميائية وأن مادة الأقطاب فيها بخلاف البطارية لا تستنفد عندما تجهز الكهرباء.

وخلية الوقود من بعض الأوجه مولد كهربائي مثالي. والتشغيل هادئ لعدم وجود أجزاء متحركة في الخلية وهي نظيفة. هذه الصفات تجعلها نوعاً واعداً من التوليد الكهربائي للمناطق الحضرية خصوصاً.

ويبين الشكل رقم (ج ـ 26ب) بنية خلية وقود هيدروجين – أكسجين. ويدخل غاز الهيدروجين (H_2) في الجزء الأيسر العلوي بينما يدخل الأكسجين في الجزء الأيمن العلوي. ويتغلغل الغازان في الأقطاب المسامية وكل منهما في تماس مباشر مع إلكتروليت سائل. والإلكتروليت في هذه الحالة هو قلوي (هيدروكسيد البوتاسيوم) $KOH.\ H_2O$ رغم أن حمض مثل حمض الفوسفوريك يمكن أن يستخدم كذلك.



الشكل ج ـ 26 أ
الوظيفة الأساسية
لخلية الوقود



الشكل ج ـ 26 ب
بنية خلية الوقود
المصدر: B. J. Crowe, Fuel Cells – A Survey. (NASA) U. S.Goverment Printing Office, Washington, DC. 1973.

وعند استخدام إلكتروليت قاعدي مثل هذا تكون أيونات الهيدروكسيل هي ناقلات الشحنة في المحلول. وتنشأ أيونات الهيدروكسيل (OH) في القطب السالب المسامي على اليمين في الشكل ج -26 ـ أ من خلال تفاعل الماء والأكسجين بوجود فائض من الإلكترونات في محلول القطب السالب. وتنتشر هذه الأيونات بعد ذلك نحو القطب الموجب. ويحرر التفاعل عند القطب الموجب الإلكترونات (L) التي تتدفق خلال الحمل الكهربائي وتقوم بدورها بتغذية تفاعلات إضافية عند القطب السالب. وتمر أيونات الهيدروكسيل أيضاً من الإلكتروليت وتتفاعل مع أي هيدروجين فائض موجود أنتجه الماء. ويوجد جهد كهربائي عبر خلية الوقود مثلما هو الحال عبر قطبي البطارية وبذلك يمكن للإلكترونات التي تستحدث أن تقوم بشغل كهربائي (انظر الملحق أ).

ويتطلب التشغيل العملي لخلية الوقود إما عامل حفاز أو درجات حرارة مرتفعة لتعزيز تفاعلات الأقطاب. وتتعدى هذه الدرجات الحرارية درجة حرارة غليان الماء عادة لذا تَعمل الخلايا تحت ضغط لمنع تحول الماء إلى بخار. والمثال الموضح في الشكل ج - 26 يوجد فيه ضغط في حجرة الإلكتروليت يبلغ 53.5 باوند على الأنش المربع (6.3 أمثال الضغط الجوي). لاحظ أيضاً وجود ضغط أعلى بقليل في حجرات الغازَين وهدف هذا التصميم تسهيل دفع الهيدروجين والأكسجين داخل الأقطاب المسامية.

ورغم أن تجهيز الأكسجين إلى خلية الوقود من الهواء أمر سهل إلا أن تجهيز الهيدروجين يحتاج إلى عملية إضافية. وقد كانت أنجح وسيلة حتى الآن لتجهيز الهيدروجين من خلال التهذيب بالبخار للنفثأ أو للغاز الطبيعي. وهذا التفاعل شبيه ببعض التفاعلات المذكورة سابقاً في هذا الملحق عند تحويل الفحم إلى غاز. وإذا ما كان المدخل هو الميثان (من الغاز الطبيعي) مثلاً فإن التفاعل هو

$$CH_4 + H_2O \longrightarrow CO + 3H_2$$

حيث إن الماء هو في الحقيقة بخار بدرجة حرارة عالية (1500° ف). ويحتاج التفاعل علاوة على درجة الحرارة العالية إلى عامل محفز مثل أكسيد النيكل والسليكون.

قامت شركة كونصوليديتد إديسون في مدينة نيويورك بعرض نموذج ريادي عامل لخلية وقود في مظاهرة رعتها مشاركة مع وزارة الطاقة الأميركية ومعهد بحوث القدرة الكهربائية. واستخدمت المنشأة طريقة تهذيب النفتا بالبخار لتزويد الهيدروجين واستخدمت حامض الفوسفوريك كإليكتروليت. واحتوت الوحدة كلها ما يزيد على 9000 خلية وقود مفردة أعطت بالربط المتوازي والتسلسلي فولتية من التيار المستمر بلغت 2800 فولت وقدرة كلية بلغت 4.8 ميغاواط كهرباء.

قدرت الكلفة الرأسمالية لخلايا الوقود بأقل من 1000 دولار للكيلواط (كهرباء) الواحد. وإذا ما صح هذا فسيجعل هذه التكنولوجيا منافسة لتوربين الاحتراق وهي الطريقة التقليدية الآن للمولدات الصغيرة في تلافي حمل الذروة. غير أن خلية الوقود مثل التوربين تستخدم الوقود الهيدروكربوني وهكذا فإن اقتصاديات النوعين –بما في ذلك الكلف التشغيلية والرأسمالية ستكون متشابهة. وحتى إذا افترضنا أن محطات خلايا القدرة ليست تنافسية إلى ذلك الحد مع توربينات الاحتراق فربما تكون الاختيار المفضل في المناطق السكنية في المدن بسبب صوتها المنخفض وتلويثها القليل للهواء.

وقد جرى التفكير بخلايا الوقود أيضاً كوسيلة لتوفير القدرة لسيارة كهربائية. والأمران المهمان هنا، كما في السيارة العاملة بالبطارية، هما خزن الوقود ووزن السيارة. فخلية تعمل بالهيدروجين والأكسجين مثلا قد تحتاج إلى خزن الهيدروجين المسيّل وسيكون الهيدروجين مهيأ في موقع منفصل كما هي الحالة مع البنزين. والإمكانية التقنية الأخرى هي على أي حال الخزن في هيدريدات المعادن حيث يتحد الهيدروجين في مركب كيميائي للخزن ثم يطلق للاستخدام بعد ذلك.

وقد جرى تقدير الخواص ذات العلاقة بالوزن للسيارات العاملة بخلايا الوقود وهي مبينة في الشكل ج.21 مع تلك العاملة بالبطارية. ويتبين من الشكل أن السيارات العاملة بخلايا الوقود تمتلك طاقات نوعية كبيرة وقدرات نوعية واطئة وهذا يعني أن هذه السيارات لها مدى عمل طويل غير أن تسريعها بطيء وسرعتها النهائية منخفضة.

والعائق الآخر في تبني خلايا الوقود لتوفير القوة المحركة في السيارات هو كلفتها عند مقارنتها بمحركات الاحتراق الداخلي التقليدية للسيارات. وستبقى الحاجة قائمة

إلى تطوير هذه التكنولوجيا وإلى تطوير هندسي لطرق إنتاجها بصورة كثيفة حتى وإن كانت مواصفاتها التقنية جيدة عند مقارنتها بالسيارات والشاحنات التقليدية.

اقتصاد الهيدروجين

رأينا في الجزء السابق الإمكانية التقنية لاستخدام الهيدروجين في خلية وقود لإنتاج الكهرباء. ويقارب الهيدروجين أن يكون وقوداً مثالياً لأنه لا ينتج إلا قليلاً من التلوث ولا يُطلق أي غازات دفيئة عندما يحترق. وغالباً ما يقال إن احتراق الهيدروجين لا يترك إلا الماء كمنتج عَرَضي إذا ما حرق في جو من الأكسجين النقي. وعند حرقه في الهواء الذي يحتوي 78 في المئة من حجمه نيتروجين و21 في المئة أكسجين تتكون أكاسيد النيتروجين كما هي الحالة عند حرق الوقود الأحفوري. إلا أن الملوثات الأخرى مثل ثاني أكسيد الكبريت لا وجود لها كما لا وجود أيضا لثاني أكسيد الكربون (وهو غاز دفيئة) سواء من حرق الهيدروجين أو من تفاعله في خلية الوقود.

لهذا السبب اقترح مفكرو المستقبل إيجاد اقتصاد هيدروجين حيث يجري اصطناع الهيدروجين فيه على نطاق واسع لاستخدامات مختلفة. ولن تقتصر فائدته على الحلول محل الغاز الطبيعي لكافة الاستخدامات الحرارية في المنازل والصناعة، بل يمكن تصوراستخدامه بديلاً للبنزين ووقود الديزل في السيارات. ومع أن هذا يعني سيارات كهربائية تدار بواسطة خلايا الوقود إلا أن سيارة احتراق داخلي تحرق الهيدروجين تعد ممكنة أيضاً.

مشكلة الهيدروجين أنه لا يوجد في الطبيعة بحالة غازية حرّة كما هي الحال مع الغاز الطبيعي (الميثان). لذا لا يعتبر مصدراً أولياً للطاقة. ويجب في كافة الأحوال فصله عن أحد مركباته وهو عادة الماء، وهناك حاجة دائماً إلى مصدر طاقة أولي (نفط أو غاز طبيعي ... إلخ) لإتمام فصل الهيدروجين عن الماء. وقد دعي الهيدروجين لهذا السبب حاملاً أو «ناقلاً» للطاقة، وهذا ما يعني أنه يخدم كوسيلة لنقل وتوزيع الطاقة، غير أنه بحد ذاته ليس بالمصدر الرئيس للطاقة مثل الوقود الأحفوري أو القوة المائية.

وتدعى طريقة تحلل الماء بالتحليل الكهربائي. والتحليل الكهربائي يشبه خلية وقود تعمل بطريقة عكسية. ويجري في خلية تحليل كهربائي تسليط فولتية كهربائية مستمرة (D.C.) عبر قطبين مغمورين في الماء مما يولد هيدروجين حر وكذلك أكسجين حر. وإذا ما كان مصدر التيار الكهربائي المستمر من مولد تقليدي يستخدم وقوداً أحفورياً كمصدر طاقة أولي فستضيع معظم مزايا الهيدروجين البيئية. أما إذا كانت مصادر الكهرباء المستخدم من ناحية أخرى غير ملوثة وغير باعثة لغازات الدفيئة كأن تكون من طاقة الرياح أو الطاقة الكهرومائية أو الشمسية فستصبح منظومة الوقود الهيدروجيني سليمة بيئياً منذ بدايتها حتى النهاية. والتوكيد الرئيس لدعاة مثل هذه الأنظمة الهيدروجينية اليوم هو على مصادر الكهرباء من الطاقة الشمسية وقد تبنى مروجو هذه التقنية مفهوم «هيدروجين شمسي».

أكثر الطرق استقامة نحو الهيدروجين الشمسي هو باستخدام الخلايا الضوئية الفولتائية لتجهيز الكهرباء إلى خلايا التحليل الكهربائي. وكل من خلايا التحليل والخلايا الضوئية الفولتائية هي تكنولوجيات مجربة وعاملة. والخلايا الضوئية الفولتائية معروفة بكونها تكنولوجيا عملية، ولو أنها مكلفة، وكذلك هي الحالة مع خلايا التحليل الكهربائي، وكلاهما بحاجة إلى تقليل كلفتهما. ومصادر الطاقة المتجددة الأخرى كالرياح والطاقة المائية والوقود الحيوي كلها سبل ممكنة إلى وقود الهيدروجين. والرياح والطاقة الكهرومائية بالطبع هي وسائل بديلة غير أحفورية أو نووية لتوليد الكهرباء لغرض التحليل. أما الوقود الحيوي فيوفر من ناحية أخرى بديلاً فعلياً. ومن الممكن اشتقاق الهيدروجين من مركبات عضوية موجودة في الطبيعة لا تحتاج إلى تحليل كهربائي وذلك باستخدام معالجات كيميائية ما زالت موضوعات بحث.

لقد تَخَيَّل المفهوم الأصلي لاقتصاد الهيدروجين محطات قدرة الاندماج النووي مستقبلاً كمصادر لكميات هائلة من الكهرباء لتزويد منشآت تحويل الهيدروجين على نطاق واسع. غير أن هذا المنظور المستقبلي قد أصبح عرضة للشك على أحسن الافتراضات ذلك لأن الجهود البحثية المتعلقة بالاندماج حول العالم لم تُقدم برهاناً على هذه القاعدة. (انظر الفصل الحادي عشر). نتيجة ذلك حلّ «الهيدروجين الشمسي» محل الخطة المستندة إلى الاندماج في السنين الأخيرة بين دعاة الهيدروجين.

وعلى الرغم من أن مكونات هذا الفهم (الخلايا الضوئية الفولتائية وخلايا التحليل) هي تكنولوجيات عاملة، إلا أنها غير قادرة على إنتاج وقود الهيدروجين بكلفة تقارب كلفة الوقود الأحفوري. ويقتصر استخدام الخلايا الضوئية الفولتائية الآن على تطبيقات خاصة محدودة القياس كما إن إمكانات التطور الكبير في هذا المجال غير مؤكدة للمستقبل المنظور. لذا يبدو أن اقتصاد الهيدروجين في أي صورة كانت سيبقى حلماً تقنياً بعيد المنال.

الثبت التعريفي

احتراق الطبقة المميعة (Fluidized Bed Combustion): تقنية مطورة لحرق الفحم الحجري (أو نوع آخر من الوقود الصلب) في المراجل، هدفها كفاءة احتراق أفضل وتقليل الملوثات. يجري في هذه التقنية استخدام الفحم المفروم (1– 3 مليمتر حجماً) مع تيارات هواء تدفع إلى أعلى خلال عملية الاحتراق، وينتج من ذلك امتزاج مضطرب للغاز والمادة الصلبة أثناء الاحتراق. وهذا يوفر احتراقاً أفضل وانتقالاً حرارياً أفضل. كذلك فإن حرارة الاحتراق تكون أقل (700° – 900°C) مما هي عليه مقارنة بالمراجل العادية (1300° – 1700°C) التي تحرق الفحم المطحون (PULVERIZED) بصورة أكثر انتظاماً. هذا يؤدي إلى تناقض تكون أكاسيد النيتروجين في غاز العادم الذي يدفع إلى المدخنة. كذلك يجري نفث مادة حجر الكلس المطحون على ارتفاع معين ضمن المرجل، وهذه المادة تتفاعل مع المواد الحامضية الكبريتية في الوقود لتزيلها وترسبها.

يمكن تشغيل هذه المراجل بضغط أعلى من الضغط الجوي ويستغل الغاز الساخن بعد أن تجري تنقيته من المواد الحامضية لتدوير توربين غازي إضافة إلى توليد البخار في المرجل ذاته (والمرجل من نوع مزود بأنابيب ماء). وبهذه الطريقة تُضبط الكفاءة الحرارية للمرجل.

تدعى هذه الطريقة بإحتراق الطبقة المميعة، لأن الفحم المسحوق يسلك عند ضخ الهواء من خلاله كطبقة مميعة يظهر فيها ما يشبه تفاعلات تحدث في سائل يغلي. وإذا ما كان سحق الفحم بحجم دقيق جداً يصبح الاحتراق من نوع احتراق الوقود المطحون وهو يختلف عن احتراق الطبقة المميعة.

اندماج نووي (Nuclear Fusion) : هو عملية ارتباط نوى مختلفة لذرات عناصر

خفيفة لتشكل نوى عناصر أثقل، ويصحب ذلك عادة إطلاق أو امتصاص طاقة. ويحدث إطلاق الطاقة عند اندماج نوى العناصر الخفيفة (ذات الوزن الذري أقل من الحديد)، بينما تحتاج النوى الأثقل عند اندماجها إلى امتصاص طاقة. ويحدث الاندماج النووي طبيعياً في النجوم، ومنها الشمس، مما يطلق كميات هائلة من الطاقة (حرارة وضوء وإشعاع). وأبسط حالات الاندماج تحدث بين ذرات الهيدروجين، فقد يكون ذلك بين نواتي ديوتيريوم (هيدروجين ثقيل تحتوي ذراته على بروتون ونيوترون) لتوليد هيليوم وإطلاق نيوترون وطاقة، أو لتوليد هيليوم وهيدروجين عادة مع طاقة، كما قد يحدث بين نواة ديوتيريوم وأخرى للتريتيوم (هيدروجين تحوي نواته على بروتون ونيوترونين) ليعطي هيليوم ثقيل مع قدر أكبر من الطاقة.

ورغم أن إحداث اندماج نووي غير مسيطر عليه (بشكل قنبلة هيدروجينية، أو ما يدعى «تفاعل حراري نووي») قد جرى عملياً، إلا أن الاندماج النووي المسيطر عليه (لغرض استحصال الطاقة منه ولتوليد الكهرباء) لايزال عصيّاً على العلماء منذ أن بدأوا بحوثهم عليه قبل ستة عقود. ويعتبر عند نجاحه مصدراً لطاقة نظيفة لانهائية.

انشطار نووي (Nuclear Fission) : هو عملية شطر نواة ذرة ثقيلة (مثل اليورانيوم) إلى شظايا أصغر حجماً. وهذه الشظايا، أو نواتج الانشطار هي عادة نوى لعناصر أخرى أخف. وينتج من الانشطار أيضاً إطلاق نيوترونين أو ثلاثة بصورة حرة. ومجموع كتل الشظايا يقل عن كتلة المادة المنشطرة بقليل، والفرق هو كتلة المادة التي تحولت إلى طاقة في هذا الانشطار والتي تستغل إما لتوليد الطاقة الكهربائية أو عند إطلاقها بصورة فجائية كانفجار نووي. ويمكن للانشطار أن يحدث عندما تقذف نوى العناصر الثقيلة بنيوترونات، كما قد يحدث ذاتياً في نوى بعض النظائر غير المستقرة إشعاعياً.

تأثير البيت الزجاجي (Green House Effect): يساعد الضوء المرئي من الشمس في تسخين سطح الأرض. ويعود سطح الأرض فيشع جزءاً من هذه الطاقة إلى الجو بصورة أشعة تحت الحمراء وتمتص جزيئات بخار الماء وثاني أكسيد الكربون معظم هذا الإشعاع وهذه بدورها تعود فتشعه نحو السطح بصورة حرارة إضافية. إن امتصاص الأشعة تحت الحمراء يسبب سخونة سطح الأرض والطبقات السفلى من

الجو بصورة كافية لتجعل سطح الأرض مكيفاً للعيش ويقدّر بأن حرارة سطح الأرض كانت ستقل بنحو 30° إلى 40°C س في حالة غياب تأثير البيت الزجاجي. إن زيادة ثاني أكسيد الكربون التي يسببها الحرق المفرط للوقود الأحفوري الهيدروكربوني ربما تزيد من تأثير البيت الزجاجي وتسبب تغيرات مناخية على المدى البعيد أو ما يعرف بالاحترار الكوني. وهناك غازات أخرى لها التأثير نفسه وربما أكثر شدة من ثاني أكسيد الكربون، وهذا يشمل الكلوروفلوركربونات وأكسيد النيتروز وغاز الميثان، ويقدر العلماء أن تركيز ثاني أكسيد الكربون في الجو قد زاد بنسبة 30 في المئة منذ بدء عصر الثورة الصناعية (في بداية القرن التاسع عشر)، بينما تضاعفت نسبة الميثان في الجو في الفترة نفسها.

توليد مزدوج (Co – Generation): اسم يطلق على أي عملية تُستغل فيها الطاقة الحرارية لأكثر من غرض واحد. وقد استخدمت هذه التسمية منذ عقود عديدة لوصف المشروع الذي يستخدم فيه البخار أو الماء الساخن بعد أن يقوم بتدوير توربين بخاري لتوليد الكهرباء لغرض التدفئة المنزلية في مواقع قريبة من محطة توليد الكهرباء. ويمكن أن يستخدم الماء الساخن/ البخار في عملية تسخين صناعية، ومازالت هذه الاستخدامات تمثل الجزء الأكبر مما يدعى توليد مزدوج.

غير أن التسمية تشمل توليد الطاقة بطريقتين من المصدر نفسه، وذلك باستخدام عادم محطة توليد غازية (توربين غازي مثلاً لتسخين مرجل صغير وتوليد بخار يستخدم لتدوير توربين بخاري منفصل). وإذا ما استخدمت طريقة ديناميكيات الموائع المغناطيسية (Magnetohydrodynamics) أو MHD لتوليد الكهرباء مباشرة من إمرار الهواء الساخن عبر قناة فيها مجال مغنطيسي، فإن الهواء الساخن (جداً) الخارج يمكن استغلاله لتشغيل توربين غازي أو بخاري ونحصل بذلك على توليد مزدوج وكفاءة حرارية عالية. ويمكن في بعض الحالات استخدام البخار أو الماء الساخن المتكثف من أسفل التوربين البخاري للتدفئة المنزلية، وبذلك يصبح المشروع ضمن (التوليد الثلاثي Tri-Generation).

إن استغلال الحرارة المهدورة في منشأة توليد كهرباء تعمل بالتوربين الغازي لتوليد بخار يستخدم مع توربين بخاري يرفع من الكفاءة الحرارية للدورة بكاملها من

حوالى 30 في المئة إلى ما يزيد على 50 في المئة، وهذا استغلال ممتاز لطاقة الاحتراق. وإذا ما تم اللجوء إلى التوليد الثلاثي فقد ادعى البعض أن الطاقة الحرارية المستغلة تبلغ 80 في المئة من طاقة احتراق الوقود خلال المراحل الثلاث.

تفاعل تسلسلي (Chain Reaction): هو عملية تفاعل كيميائية أو فيزيائية تسبب نواتجها الرئيسة أو الثانوية تفاعلات إضافية من ذات النوع. مثال ذلك عندما يضرب نيوترون نواة ذرة قابلة للانشطار، فستنشطر تلك النواة محررة من بين أشياء أخرى أكثر من نيوترون واحد، يقوم كل منها إذا ما اصطدم بنواة من النوع نفسه بتهشيمها مطلقاً عدداً أكثر من النيوترونات، وبذلك يستمر التفاعل ويزداد إتساعاً.

هذا التفاعل يحدث عند تفجير شحنة من مادة قابلة للانشطار (مثل اليورانيوم 235 أو البلوتونيوم)، ونحصل على انفجار نووي. وإذا ما جرت السيطرة على التفاعل بحيث يجري امتصاص قدر كبير جداً من النيوترونات الناتجة من الانشطار، يمكن أن يستمر التفاعل على وتيرة تحددها نسبة النيوترونات التي يجري امتصاصها إلى الذرات الناتجة من التفاعل، وهذا ما ندعوه تفاعل تسلسلي مسيطر عليه. وهو ما يحدث بالضبط في مفاعل قدرة نووي.

خلية الوقود (Fuel Cell): هي خلية كهروكيميائية تنتج الكهرباء مباشرة باستخدام أنواع معينة من الوقود. وتتولد الكهرباء من خلال التفاعل الذي يحدث خلال محلول إلكتروليتي بين الوقود (على الجهة الموجبة) ومادة مؤكسدة (على الجهة السالبة). وتتسرب المواد المتفاعلة إلى الخلية بينما تتسرب نواتج التفاعل إلى الخارج، ويبقى المحلول الإلكتروليتي في الخلية وتتدفق الكهرباء عند ربط القطبين عبر دائرة كهربائية. وهناك عدد من أنواع المواد التي يمكن أن تستخدم في خلايا الوقود مع أنواع مختلفة من المحاليل الإلكتروليتية، وهي تعمل بدرجات حرارية مختلفة تبعاً لنوعها. وخلايا الوقود مولدات كهربائية ممتازة صامتة لا تحدث تلوثاً صوتياً وكذلك في معظم أنواعها لا تحدث تلوثاً بيئياً، وكلفة تصنيعها بسيطة غير أن كلفة التشغيل لا تقارن بكلفة توليد الكهرباء بالطرق التقليدية. وإذا ما حدث اختراق تكنولوجي يمكّن من توليد الكهرباء من خلايا الوقود بكلفة تنافسية ففي الإمكان استخدامها على مجال واسع لتوفير متطلبات النقل إن لم يكن للتوليد المركزي بدل محطات القدرة الكهربائية.

الطاقة (Energy) : تعرف الطاقة بأنها القدرة على أداء شغل. وهي مقدار فيزيائي قابل للقياس ويصف مقدار الشغل الذي تنجزه قوة. والطاقة يمكن أن تكون مختزنة، وتدعى عند ذلك (طاقة كامنة) أو إنها فاعلة تقوم فعلاً بإنجاز شغل وتدعى عند ذلك (طاقة حركية).

من ناحية أخرى هناك أنواع متعددة من الطاقة (وأي منها يمكن أن يكون بحالة كامنة أو حركية) ومنها:

الطاقة الميكانيكية وتوجد بعدة أشكال منها حركية وصوتية وطاقة شد سطحي أو طاقة مختزنة بشكل ضغط غاز أو طاقة في لولب مضغوط.

الطاقة الكهرومغنطيسية، ومن أمثلتها الكهرباء العادية المتدفقة في الشبكات والعدد الكهربائية. والكهروستاتية، ومن أمثلتها البرق الجوي والطاقة المغنطيسية أيضاً.

الطاقة الحرارية وهي موجودة في كل الأجسام التي تزيد حرارتها على الصفر المطلق (273 درجة مئوية).

الطاقة الكيميائية وتتمثل في الطاقة الموجودة في أواصر الذرات التي تربط الذرات والتي نستفيد عند تغيير (فك أو ربط) هذه الأواصر مثل ما يحدث عند احتراق الوقود (ربط ذرات الكربون أو الهيدروجين مع ذرات الأكسجين).

الطاقة النووية وهي الطاقة الكامنة في نواة الذرة والتي تربط الجسيمات النووية مثل البروتونات والنيوترونات سوية. ويجري إطلاق هذه الطاقة في التفاعلات الانشطارية أو الاندماجية بصورة فجائية. كذلك تطلق هذه الطاقة بصورة بطيئة بالانشطار الطبيعي لبعض النوى (كما يحصل في المفاعلات).

تخضع الطاقة بكافة أنواعها إلى قانون حفاظية الطاقة الذي ينص «إن الطاقة لا تفنى ولا تستحدث غير أنها قابلة للتحول من نوع إلى آخر» أي مثلاً من طاقة حرارية في البخار إلى طاقة ميكانيكية حركية كما في التوربين البخاري. أو من طاقة كيميائية (في عملية الاحتراق) إلى طاقة ميكانيكية حركية كما في توربين الاحتراق الغازي.

الطاقة المتجددة (Renewable Energy): هي الطاقة المستحصلة من مصادر طبيعية تعوِّض ما استخدم منها بصورة ذاتية. أمثلة ذلك، طاقة الشمس وطاقة الرياح أو طاقة المد أو الموج البحري والطاقة الجيوحرارية وكذلك الأنواع التقليدية من الطاقة المستحصلة من سقوط الماء ومن حرق الكتلة الحيوية مثل الخشب أو روث الحيوانات. ومثلت الطاقة المتجددة 18 في المئة من الطاقة المستهلكة على مستوى العالم أجمع. وفي سنة 2006 كان 13 في المئة منها نتج من حرق الكتلة الحيوية و3 في المئة من المحطات الكهرومائية، بينما مثلت المصادر الأخرى والتي بدأ استخدامها يتوسع بسرعة بنحوِ 2.4 في المئة.

الكفاءة الحرارية (Thermal Effeciency): هي كفاءة الآلة أو المعدّة في استغلال المحتوى الحراري للوقود المستهلك. وقد يكون المُخرج بهيئة شغل ميكانيكي (كما في محرك ديزل أو توربين غازي) أو حراري (كما في مرجل). والمحتوى الحراري للوقود قد يُقاس بطريقة (القيمة الحرارية العليا) وهي تتضمن احتساب الحرارة الكامنة في أي بخار ماء ينتج الاحتراق، أو بطريقة (القيمة الحرارية الدنيا) وهي تساوي القيمة الحرارية العليا مطروحاً منها الحرارة الكامنة في أي بخار ماء ينتج من الاحتراق.

والحرارة غير المستغلة عادة تطرح كحرارة فضلة أو حرارة مهدورة (Waste Heat) لذا فإن:

الشغل المستحصل + حرارة الفضلة = المحتوى الحراري للوقود

كما إن الكفاءة الحرارية = الشغل المستحصل/ المحتوى الحراري للوقود

= المحتوى الحراري – حرارة الفضلة/ المحتوى الحراري للوقود

= 1– حرارة الفضلة/المحتوى الحراري للوقود

وتبلغ هذه الكفاءة في حالة الآلات الحرارية التي تؤدي شغلاً نحو 51 في المئة كحد أقصى في أفضل ماكنة ديزل ونحو 40 في المئة لأفضل توربين غاز، بينما لا تتجاوز 30 في المئة لأفضل ماكنة تعمل بالبنزين على أساس دورة أوتو (أي ماكنة سيارة).

والكفاءة الحرارية للآلة المحركة لا يمكن أن تتجاوز كفاءة كارنو النظرية. وهذه الكفاءة = 1– درجة الحرارة المطلقة لطرح الفضلة/ درجة الحرارة المطلقة للاحتراق.

وهكذا إذا كان لدينا احتراق بدرجة 1000°C (1273 كلفن) وإطلاق لغاز العادم بدرجة 130°C (403 كلفن) فإن كفاءة كارنو ستكون:

$$0.683 = 0.317 - 1 = 1273/403 - 1$$

أي إن كفاءة كارنو في هذه الحالة هي 68.3٪

وهكذا فإن ما يقرر كفاءة الآلة الحرارية هي حرارة الاحتراق وحرارة العادم. وحرارة الاحتراق تحددها نوعية مادة الآلة الحرارية ودرجة تحملها، أما حرارة العادم فتعتمد على تصميم الآلة الحرارية والطريقة التي تستطيع بها استخلاص الحرارة لتحويلها إلى شغل. وفي حالة كون حرارة العادم عالية (كما هي الحال في التوربين الغازي) يمكن استغلال غازات العادم لتشغيل مرجل واستخراج بخار لتشغيل توربين بخاري وسيكون لدينا في هذه الحالة دورة مدمجة نستطيع بواسطتها رفع كفاءة المنظومة المزدوجة الحرارية إلى أعلى من 60 في المئة. كذلك يمكن استغلال الحرارة في غاز العادم لتسخين الماء في معالجة صناعية أو لتسخين الدور أو غير ذلك.

إن رفع الكفاءة الحرارية يعني استغلالاً أمثل للوقود وهو هدف كل مصمم لنظام طاقة أو نظام صناعي.

مفاعل نووي (Nuclear Reactor): المفاعل النووي منشأة يحدث فيها تفاعل نووي تسلسلي في ظروف مسيطر عليها ويستمر على وتيرة مستقرة قابلة للزيادة أو الإنقاص. وعادة يستخدم المفاعل النووي لتوليد حرارة تستغل لإنتاج الكهرباء أو لتوفير القدرة للسفن والغواصات أو لتحلية الماء، كما توجد أنواع متخصصة تستخدم في البحوث العلمية وفي إنتاج النظائر المشعة أو في استخدامات أخرى.

تعتمد المفاعلات النووية على وقود من عناصر قابلة للانشطار بتأثير النيوترونات من نوع اليورانيوم 235 أو البلوتونيوم 239 أو البلوتونيوم 241. وعند انشطار هذه الذرات الثقيلة ينجم عنها عنصران أو أكثر أخف منها وإشعاع غاما وبعض النيوترونات وطاقة حركية. وتمتص بقية الذرات جزءاً من النيوترونات المنطلقة، وبذلك يستمر التفاعل بتزايد (انظر تفاعل تسلسلي). يجري التحكم في سرعة التفاعل بواسطة مواد تمتص جزءاً من النيوترونات أو تحولها من نيوترونات سريعة إلى

نيوترونات بطيئة (حرارية) وتدعى مهدِّئات. ويستخدم لهذا الغرض الماء العادي أو الماء الثقيل أو الغرافيت.

تتولد الحرارة في المفاعل من خلال:

ـ الطاقة الحركية لمنتجات الانشطار التي تتحول إلى طاقة حرارية عند اصطدامها بذرات مجاورة.

ـ أشعة غاما التي تتحول إلى حرارة عند امتصاصها.

ـ الحرارة التي ينتجها التحلل الإشعاعي لمنتجات الانشطار والمواد التي فُعِّلت بامتصاص النيوترونات. وهذا النوع من الحرارة يستمر في التولد لبعض الوقت بعد إيقاف المفاعل والتفاعلات الانشطارية فيه.

ويجري امتصاص الحرارة ـ للاستفادة منها في مفاعلات توليد الطاقة أو للتبريد فقط في مفاعلات البحوث ـ بواسطة وسط تبريد قد يكون غازياً مثل ـ ثاني أكسيد الكربون كما في مفاعلات النوع المدعو ماغنوكس ـ أو الماء، أو معدن، أو ملح معدني منصهر كما في المفاعلات المولدة التي تستخدم الصوديوم السائل لامتصاص ونقل الحرارة.

إن الطاقة الكامنة في نواة الذرة ذات مقادير هائلة مقارنة بالطاقة الكيميائية الناتجة من الاحتراق. فكيلوغرام واحد من اليورانيوم 235، عندما يُستخدم كوقود نووي، يحوِّل ما يزيد على مليون ونصف مليون ضعف الطاقة التي يطلقها احتراق كيلوغرام واحد من المواد النفطية (7.2×10^{13} جول لكيلوغرام واحد من اليوارنيوم 235 مقارنة بنحو 4.2×10^{7} جول لكيلوغرام من زيت الوقود).

وقود تركيبي (Synthetic Fuel): هو وقود مصنّع من الفحم أو الغاز أو الكتلة الحيوية أو من مصادر أخرى كنفايات المطاط أو البلاستيك. وقد يكون بصورة سائلة أو غازية، رغم أن الوكالة الدولية للطاقة تعرِّف الوقود التركيبي بأنه وقود سائل.

هناك طرق لتحويل الفحم أو المواد الصلبة الأخرى إلى وقود سائل بصورة مباشرة من دون المرور بالمرحلة الغازية وتدعى بطرق التحويل المباشر، ومنها طريقة

برغيوس (Bergius Process) التي طورها الكيميائي الألماني فريدريش برغيوس قبل الحرب العالمية الأولى. وقد استخدمها الألمان في الحرب العالمية الثانية لإنتاج وقود الطائرات.

وهناك طرق غير مباشرة تتضمن تحويل الفحم والمواد الصلبة إلى غاز هيدروكربوني بهدرجة الفحم الذي يحول في معالجة لاحقة إلى منتجات هيدروكربونية سائلة مثل النفتا، ووقود توربينات الطائرات، ووقود الديزل، وزيوت التزليق.

ويتميز الوقود التركيبي المصنع وخاصة عند مروره بالمرحلة الغازية التي يسهل تنقية المادة فيها من أي آثار للكبريت بنقائه وخلوه من أي ملوثات مقارنة بالمشتقات المستحصلة من تقطير النفط من مصافي التكرير. كما إن الملوثات الناتجة من وقود الديزل ووقود النفاثات المستخلص من الغاز الطبيعي المحول إلى سوائل بواسطة تقنية (Gas- to- Liquid) أو GTL تقل كثيراً عن مثيلاتها من مصدر نفطي.

يجري اليوم إنشاء عشرات المصانع لتحويل الغاز الطبيعي إلى هذه الأنواع من المنتجات، بعضها تعتمد الطريقة المدعوة فيشر ـ تروبش، كما توجد مصانع أخرى تختص بإنتاج الميثانول وهو مادة أساس بتروكيميائية يمكن استخدامها أيضاً كوقود.

وقود أحفوري (Fossil fuel): سميت بعض الأنواع من الوقود بهذا الاسم نسبة إلى الأحفوريات التي تقول النظرية إنها أصل هذه الأنواع. والأحفوريات جمع أحفور هي بقايا الحيوانات والنباتات المطمورة والمتحجرة في الأرض من عصور جيولوجية قديمة. وتشمل أنواع الوقود الأحفوري الفحم الحجري والنفط الخام والغاز الطبيعي. وجميع هذه الأنواع هي مواد هيدروكربونية تختلف نسب الهيدروجين إلى الكربون فيها من نوع إلى آخر. تحوي كذلك نسباً مختلفة من مركبات كيميائية أخرى كالكبريت أو النيتروجين أو من عناصر أخرى.

والرأي المتفق عليه علمياً ـ رغم وجود آراء تُعارض ذلك ـ هو أن مصدر هذا الوقود هو التحلل اللاهوائي للمواد الحيوية المطمورة، وإن الضغط والحرارة الشديدين حوَّلا هذه الحيويات إلى أنواع الوقود المذكورة. وعمر هذه المواد هو ملايين السنين

ويصل إلى أكثر من 650 مليون سنة في بعض أنواعها.

وتشكل هذه الأنواع مصدراً لأكثر من 85 في المئة من الطاقة التي يستخدمها الإنسان وهي مصدر غير متجدد قابل للاستنفاد، كما إنها تنتج غاز ثاني أكسيد الكربون الذي يعتبر من الغازات المسببة للاحتباس الحراري. وذلك إضافة إلى تلويث الجو إذا ما كانت تحوي شوائب كبريتية أو غيرها.

ثبت المصطلحات

ثبت المصطلحات
عربي – إنجليزي

الإخلاء	Evacuation
إرسال الفولتية العالية	High-Voltage Transmission
استخراج	Extraction
الإشعاع منخفض المستوى	Low Level Radiation
الأضواء القصوري أو العطالي	Inertial Containment
إفادة من طاقة ضائعة	Cogeneration
انحراف (في المفاعلات النووية)	Excursion
الانحلال الاشعاعي	Radioactive Decay
الاندماج البارد	Cold Fusion
الاندماج النووي	Nuclear Fusion
إندماج موجّه بالليزر	Laser – Driver Fusion
انصهار لب المفاعل	Reactor Core Meltdown
تأثير البيت الزجاجي (الدفيئة)	Greenhouse Effect
تحطم	Disintegration
التحكم بالاحتراف	Combustion Control
تحلل حراري	Pyrolsis
تحلل مائي	Hydrolysis
التحويل المباشر للطاقة الشمسية	Direct Solar conversion
تسيّل	Liquefaction
تصحر، إزالة أحراج من بقعة ما	Deforestation
التغيير المناخي	Climate Change
تغيير خواص	Denaturing
تفاعل حرج	Critical Reaction
تفاعل منفلت	Runaway Reaction

تفاعلات نووية حرارية متحكم بها	Controlled Thermonuclear Reaction (CTR)
التقاط أو احتجاز النيوترون	Neutron Capture
توربين ارتكاسي	Reaction Turbine
توربين زخم	Impact Turbine
توفير أو حفظ الطاقة	Conservation of Energy
تيار دوامي	Eddy Current
تيار مباشر	Direct Current
الجرعة الإشعاعية	Radiation Dose
جسيمات	Particulates
حاجز	Baffle
حادث تمزق قلب المفاعل	Core disruption accident (CDA)
حث كهرومغنطيسي	Electromagnetic Induction
حراري منتظم	Isothermal
حركي	Kinetic
الحمأة والرماد	Ash and Sludge
الحماية من المواد ذات النشاط الإشعاعي	Radioactive Sheilding
خطوط الإرسال	Transmission Lines
دقائق	Particles
دوار (جزء في ماكنة)	Rotor
ديناميك مائي مغنطيسي	Magnetodynamies (MHD)
ساكن (جزء في ماكنة)	Stator
شفرة (توربينية)	Blade
طاقة هيدروحرارية	Hydrothermal Energy
طاقة هيدروكهربائية	Hydroelectric Generation
طور	Phase
عمود (محور)	
محور (انظر عمود)	Shaft
غاز طبيعي مسال	Liquefied Natural Gas

فجوة	Void
فوّهة	Nozzle
فيض	Flux
قانون فا إداي للحث	Faraday's Law of Induction
قيم العتبة للمخاطر	Threshold Values of Risk
قيمة العتبة	Threshold Value
كتلة	Mass
كسح	Scavenging
كفاءة حرارية	Thermal Effeciency
كفاءة مكبحية	Brake Effeciency
لابلوري	Amorphous
لاعكوسية	Irreversiblity
محرّك بخاري	Steam Engine
محرّكات الاحتراق الداخلي	Internal Combustion Engines
محور قلاب	Crank shaft
محولات كهربائية	Electrical Transformers
مُخْرج	Output
مُدْخل	Input
مرسب	Precipitator
مرّسب كهروستاتيكي	Electrostatic Precipitator
مسامية	Porosity
مستحلب	Emulsion
مسترد حرارة	Recuperator
معاهدة منع إنتشار الأسلحة النووية	Nuclear Non-Proliferation Treaty (NPT)
معجل جسيمات (نووية)	Particle Accelerator
مغوز ليرجي	Lurgi Gasifier
مفاعل الماء المضغوط	Reactor (PWR) Pressurized water
مفاعل المياه الثقيلة	Heavy water Reactor (HWR)

مفاعل المياه الخفيفة	Light Water Reactor (LWR)
مفاعل شورمان النووي	Shoreham Nuclear Plant
مفاعل قدرة نوع معدن سائل سريع	Breeder Reactor (LMFBR) Liquid Metal Fast
مفاعلات التحويل	Conversion Reactors
مكثّف	Condenser
ملاط	Slurry
منظمة الدول المصدرة للبترول	Exporting Countries (OPEC) Organization of Petroleum
الموارد القابلة للتجدد	Renewable Resources
موصلية	Conductivity
موصلية فائقة	Superconductivity
نسبة الانضغاط	Compression Ratio
نظائر اليورانيوم	Uranim Isotope
نظام سلامة مهنّدس	Engineered Safety system (ESS)
نفاذية	Permeability
نفايات مفيدة	High-Level Wastes (HLW)
نوع أولي	Prototype
نيغا واط	Negawatts
هيرتز	Hertz (HZ)
وصلة نصف موصلة	Semiconductor Junction
وقود أحفوري	Fossil Fuel
وقود حيوي سائل	Liquid BioFuels
وكالة الطاقة الذرية الدوليّة	International AtomicEnergy Agency (IAEA)

ثبت المصطلحات
إنجليزي – عربي

Amorphous	لابلوري
Ash and Sludge	الحمأة والرماد
Baffle	حاجز
Blade	شفرة (توربينية)
Brake Efficiency	كفاءة مكبحية
Climate Change	التغيير المناخي
Cogeneration	إفادة من طاقة ضائعة
Cold Fusion	الاندماج البارد
Combustion Control	التحكم بالاحتراف
Compression Ratio	نسبة الانضغاط
Condenser	مكثّف
Conductivity	موصلية
Conservation of Energy	توفير أو حفظ الطاقة
Controlled Thermonuclear Reaction (CTR)	تفاعلات نووية حرارية متحكم بها
Conversion Reactors	مفاعلات التحويل
Core disruption accident (CDA)	حادث تمزق قلب المفاعل
Crank shaft	محور قلاب
Critical Reaction	تفاعل حرج
Deforestation	تصحر، إزالة أحراج من بقعة ما
Denaturing	تغيير خواص
Direct Current	تيار مباشر
Direct Solar conversion	التحويل المباشر للطاقة الشمسية
Disintegration	تحطم

Eddy Current	تيار دوامي
Electrical Transformers	محولات كهربائية
Electromagnetic Induction	حث كهرومغنطيسي
Electrostatic Precipitator	مرَّسب كهروستاتيكي
Emulsion	مستحلب
Engineered Safety system (ESS)	نظام سلامة مهنّدس
Evacuation	الإخلاء
Excursion	انحراف (في المفاعلات النووية)
Extraction	استخراج
Faraday's Law of Induction	قانون فا إداي للحث
Flux	فيض
Fossil Fuel	وقود إحفوري
Greenhouse Effect	تأثير البيت الزجاجي (الدفيئة)
Heavy water Reactor (HWR)	مفاعل المياه الثقيلة
Hertz (HZ)	هيرتز
High-Level Wastes (HLW)	نفايات مفيدة
High-Voltage Transmission	إرسال الفولتية العالية
Hydroelectric Generation	طاقة هيدروكهربائية
Hydrolysis	تحلل مائي
Hydrothermal Energy	طاقة هيدروحرارية
Impact Turbine	توربين زخم
Inertial Containment	الأضواء القصوري أو العطالي
Input	مُدْخل
Internal Combustion Engines	محرّكات الاحتراق الداخلي
International Atomic Energy Agency (IAEA)	وكالة الطاقة الذرية الدوليّة
Irreversibility	لاعكوسية
Isothermal	حراري منتظم

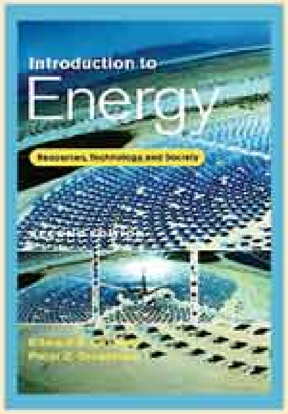
Kinetic	حركي
Laser – Driver Fusion	اندماج موجّه بالليزر
Light Water Reactor (LWR)	مفاعل المياه الخفيفة
Liquefaction	تسيّل
Liquefied Natural Gas	غاز طبيعي مسال
Liquid BioFuels	وقود حيوي سائل
Liquid Metal Fast Breeder Reactor (LMFBR)	مفاعل قدرة نوع معدن سائل سريع
Low Level Radiation	الإشعاع منخفض المستوى
Lurgi Gasifier	مغوز ليرجي
Magnetodynamies (MHD)	ديناميك مائي مغنطيسي
Mass	كتلة
Negawatts	نيغا واط
Neutron Capture	التقاط أو احتجاز النيوترون
Nozzle	فوّهة
Nuclear Fusion	الاندماج النووي
Nuclear Non-Proliferation Treaty (NPT)	معاهدة منع إنتشار الأسلحة النووية
Organization of Petroleum Exporting Countries (OPEC)	منظمة الدول المصدرة للبترول
Output	مُخْرج
Particle Accelerator	معجل جسيمات (نووية)
Particles	دقائق
Particulates	جسيمات
Permeability	نفاذية
Phase	طور
Porosity	مسامية
Precipitator	مرسب
Pressurized water Reactor (PWR)	مفاعل الماء المضغوط

نوع أولي	Prototype
تحلل حراري	Pyrolsis
الجرعة الإشعاعية	Radiation Dose
الانحلال الاشعاعي	Radioactive Decay
الحماية من المواد ذات النشاط الإشعاعي	Radioactive Sheilding
توربين ارتكاسي	Reaction Turbine
انصهار لب المفاعل	Reactor Core Meltdown
مسترد حرارة	Recuperator
الموارد القابلة للتجدد	Renewable Resources
دوار (جزء في ماكنة)	Rotor
تفاعل منفلت	Runaway Reaction
كسح	Scavenging
وصلة نصف موصلة	Semiconductor Junction
عمود (محور)	
محور (انظر عمود)	Shaft
مفاعل شورمان النووي	Shoreham Nuclear Plant
ملاط	Slurry
ساكن (جزء في ماكنة)	Stator
محرّك بخاري	Steam Engine
موصلية فائقة	Superconductivity
كفاءة حرارية	Thermal Effeciency
قيمة العتبة	Threshold Value
قيم العتبة للمخاطر	Threshold Values of Risk
خطوط الإرسال	Transmission Lines
نظائر اليورانيوم	Uranim Isotope
فجوة	Void

الفهرس

مدخل إلى الطاقة

المصادر والتكنولوجيا والمجتمع(*)



(*) الكتاب الثاني من الطاقة

السلسلة: تضم هذه السلسلة ترجمة لأحدث الكتب عن التقنيات التي يحتاج إليها الوطن العربي في البحث والتطوير ونقل المعرفة إلى القارئ العربي.

الكتاب: يوفر هذا الكتاب خلاصة بحوث نقدية حول مصادر الطاقة وقواها المحركة للسوق، وأثرها في الإنتاج الحالي. ويستكشف ما جلبته الطاقة لنا من منافع ومشاكل بعد أن يستحضر المحتوى الفلسفي والاجتماعي لمفهوم التكنولوجيا لسرد المعضلات التي نجمت عن الاعتماد المصيري على الطاقة الأحفورية. كما ويستشرف الكتاب دور البدائل المتاحة للطاقة وتكنولوجيات إنتاجها، وتأثير انبعاثات غازات الدفيئة على المناخ والبيئة.

يوفر الكتاب مادة علمية رصينة للدراسات الجامعية الأولية في العلوم والتكنولوجيا، بالإضافة إلى علوم البيئة والمعادن واقتصاديات الطاقة.

المؤلف: **إدوارد س. كاسيدي**: أستاذ متمرس في قسم الهندسة الكهربائية، الجامعة التكنولوجية في بروكلين، نيويورك.

بيتر ز. غروسمان: أستاذ مساعد في مادة الاقتصاد، كلية إدارة الأعمال، جامعة بتلر، إنديانابوليس

المترجم: **صباح الدملوجي**: مهندس ميكانيك متخصص بقضايا النفط والغاز وتحويل الطاقة.

سلسلة كتب التقنيات الاستراتيجية والمتقدمة

1. المياه
2. البترول والغاز
3. البتروكيمياء
4. النانو
5. التقنية الحيوية
6. تقنية المعلومات
7. الإلكترونيات والاتصالات والضوئيات
8. الفضاء والطيران
9. الطاقة
10. المواد المتقدمة
11. البيئة

مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية KACST

المنظمة العربية للترجمة

ISBN 978-9953-82-387-4

الثمن: 30 دولاراً
أو ما يعادلها

مدخل إلى الطاقة
المصادر والتكنولوجيا والمجتمع

إدوارد س. كاسيدي
بيتر ز. غروسمان

(9 - 2)